



**SKRIPSI – TK141581**

**STUDI KINETIKA REAKSI ABSORPSI GAS CO<sub>2</sub>-NO<sub>2</sub>  
MENGUNAKAN MDEA BERPROMOTOR CAMPURAN  
ASAM AMINO**

**Oleh :  
ALI SAHAB AMRIN  
NRP. 2313100097**

**AUDRIA ALIZA SETIO UTARI  
NRP. 2313100157**

**Dosen Pembimbing :  
Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M.Eng  
NIP. 1961 10 21 1986 03 1001**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2017**



**FINAL PROJECT – TK141581**

**REACTION KINETIC STUDY OF CO<sub>2</sub>-NO<sub>2</sub> ABSORPTION  
WITH MDEA AND MIX OF AMINO ACIDS AS THE  
PROMOTER**

**Presented By :  
ALI SAHAB AMRIN  
NRP. 2313100097**

**AUDRIA ALIZA SETIO UTARI  
NRP. 2313100157**

**Adviser :  
Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M.Eng  
NIP. 1961 10 21 1986 03 1001**

**CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2017**

# LEMBAR PENGESAHAN

## Studi Kinetika Reaksi Absorpsi Gas CO<sub>2</sub>-NO<sub>2</sub> Menggunakan MDEA Berpromotor Campuran Asam Amino

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S-1  
Departemen Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya

Oleh :

**Ali Sahab Amrin**  
**Audria Aliza Setio Utari**

**2313100097**  
**2313100157**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M.Eng. .... (Pembimbing)
2. Prof. Dr. Ir. Arief Widjaja, M.Eng. .... Penguji I)
3. Ir. Nuniek Hendrianie, M.T. .... (Penguji II)



# STUDI KINETIKA REAKSI PENYERAPAN GAS CO<sub>2</sub>-NO<sub>2</sub> MENGUNAKAN MDEA BERPROMOTOR CAMPURAN ASAM AMINO

Mahasiswa : Ali Sahab Amrin (2313100097)  
Audria Aliza Setio Utari (2313100157)  
Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M.Eng.

## ABSTRAK

Pemanasan global oleh karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) merupakan masalah serius yang salah satunya diakibatkan oleh hasil pembakaran bahan bakar fosil. Biogas merupakan salah satu sumber energi terbarukan berasal dari biomassa yang memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai pengganti bahan bakar fosil. Sumber energi ini diproduksi melalui fermentasi yang menghasilkan beberapa pengotor (*impurities*) yang merugikan seperti CO<sub>2</sub> dan asam sulfida (H<sub>2</sub>S). CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S yang dihasilkan mencapai 25-50 % dan 0.5-1% dari total biogas yang terproduksi. Kerugian yang diakibatkan *impurities* ini adalah turunnya nilai bakar biogas dan bersifat korosif sehingga dapat merusak alat yang digunakan. Untuk itu, perlu ada peningkatan kualitas biogas dengan menghilangkan kandungan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S pada biogas yang mana salah satu teknologi untuk menghilangkan kandungan CO<sub>2</sub> tersebut adalah absorpsi disertai reaksi kimia. Salah satu absorbent yang umum digunakan pada proses absorpsi reaktif ini adalah *Methyldiethanolamine* (MDEA) yang diberi promotor untuk meningkatkan performa absorpsinya. Asam amino telah diteliti sebagai promotor yang cukup baik dalam meningkatkan kinetika reaksi penyerapan CO<sub>2</sub> pada MDEA. Namun, penelitian pada campuran asam amino sebagai promotor belum banyak dilakukan. Penelitian ini akan mempelajari pengaruh kinetika reaksi penyerapan CO<sub>2</sub> pada MDEA menggunakan promotor campuran asam amino yaitu *arginine* dan *glycine* pada *Wetted Wall*

*Column* (WWC). Variabel-variabel yang digunakan adalah suhu dan konsentrasi promotor. Suhu operasi yang digunakan 303.15, 313.15, dan 323.15 K dan konsentrasi berat promotor yang digunakan adalah 1% dan 5%. Pada studi ini, didapatkan persamaan konstanta laju reaksi penyerapan gas CO<sub>2</sub> yaitu  $k_{\text{Arginine}} = 9.1 \times 10^{13} \exp(-6530.54/T)$  (sistem MDEA-Arginine-Glycine),  $k_{\text{Glycine}} = 5.71 \times 10^6 \exp(-2365.23/T)$  (sistem MDEA-Arginine-Glycine),  $k_{\text{Arginine murni}} = 1.73 \times 10^{14} \exp(-6660.33/T)$  (sistem MDEA-Arginine),  $k_{\text{Glycine murni}} = 5.21 \times 10^{16} \exp(-9169.86/T)$  (sistem MDEA-Glycine), dan  $k_{\text{MDEA}} = 1.146 \times 10^{16} \exp(-9567.0532/T)$  (sistem MDEA) (m<sup>3</sup>/kmol.det).

***Kata kunci:*** *Absorpsi, Asam Amino, Biogas, CO<sub>2</sub>, Wetted Wall Column*

# REACTION KINETIC STUDY OF CO<sub>2</sub>-NO<sub>2</sub> ABSORPTION WITH MDEA AND MIX OF AMINO ACIDS AS THE PROMOTER

Students : Ali Sahab Amrin (2313100097)  
Audria Aliza Setio Utari (2313100157)  
Adviser : Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M.Eng.

## ABSTRACT

*Global warming by carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) causes serious problems, mainly accounted by burning of fossil fuels. Biogas is a renewable source of energy derived from biomass that has potential to be developed as a replacement for fossil fuels. This source of energy is obtained through fermentation, which produces some harmful impurities such as CO<sub>2</sub> and hydrogen sulfide (H<sub>2</sub>S). The resulting CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S reach 25-50% and 0.5-1% from the total composition. The impurities can reduce biogas' heating value and are corrosive, which would damage tools. Therefore, the quality of biogas will increase if the impurities are removed through absorption with chemical reactions. One absorbent usually used is Methyldiethanolamine (MDEA) with a promoter to increase its performance. Amino acid has been tested as a qualified promoter to increase the kinetic reaction of CO<sub>2</sub> absorption. On the other hand, currently there are not enough researches about the use of amino acid as a promoter. This research's aim is to study the effect of CO<sub>2</sub> kinetic reaction by MDEA with a mix of amino acid as the promoter by using Wetted Wall Column (WWC). The variables used in this study are temperature and promoter's concentration. The temperature which will be tested are 303.15, 313.15, and 323.15 K, meanwhile the promoter's concentration are 1 wt.% and 5 wt.%. From the experience and data calculation, the constant equation of CO<sub>2</sub> absorption kinetic velocity result is as follow;  $k_{\text{Arginine}} = 9.1 \times 10^{13}$*

$\exp (-6530.54/T)$  (MDEA-Arginine-Glycine system),  $k_{\text{Glycine}} = 5.71 \times 10^6 \exp (-2365.23/T)$  (MDEA-Arginine-Glycine system),  $k_{\text{Pure Arginine}} = 1.73 \times 10^{14} \exp (-6660.33/T)$  (MDEA-Arginine system),  $k_{\text{Pure Glycine}} = 5.21 \times 10^{16} \exp (-9169.86/T)$  (MDEA-Glycine system), and  $k_{\text{MDEA}} = 1.146 \times 10^{16} \exp (-9567.0532/T)$  (MDEA system) ( $\text{m}^3/\text{kmol.s}$ ).

**Keywords:** Absorption, Amino Acid, Biogas, CO<sub>2</sub>, *Wetted Wall column*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kami sampaikan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena hanya dengan rahmat dan berkah-Nya kami dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul :

### **”STUDI KINETIKA REAKSI PENYERAPAN GAS CO<sub>2</sub>-NO MENGUNAKAN MDEA BERPROMOTOR CAMPURAN ASAM AMINO ”**

Skripsi ini merupakan salah satu persyaratan kelulusan Program Studi S-1 di Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada kesempatan ini kami menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M.Eng. selaku dosen Pembimbing atas bimbingan dan saran yang telah diberikan.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Arief Widjaja, M.Eng. selaku Kepala Laboratorium Teknologi Biokimia.
3. Bapak Juwari, S.T., M.Eng., Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTI-ITS Surabaya.
4. Mas Toto Iswanto, S.T. yang telah banyak membantu dan membimbing proses pengerjaan laporan ini dari awal hingga akhir.
5. Bapak Hermawan, Bapak Hasan, Bapak Babay, dan Bapak Dedi, selaku alumni dan karyawan PT Pertamina yang telah banyak membantu dalam pengadaan bahan-bahan penelitian.
6. Bapak dan Ibu Dosen Pengajar serta seluruh karyawan Departemen Teknik Kimia FTI – ITS.
7. Orang tua, saudara-saudara, serta teman-teman, atas doa, bimbingan, perhatian, dan kasih sayang yang selalu tercurah selama ini. Serta seluruh pihak yang telah



membantu dalam penyusunan skripsi ini secara langsung maupun tidak langsung.

Kami menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan laporan ini. Oleh karena itu, kami sangat mengharapkan saran dan masukan yang konstruktif demi kesempurnaan laporan ini.

Surabaya, Juli 2017  
Penyusun

# DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR TABEL .....	xi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
I.1 Latar Belakang .....	1
I.2 Perumusan Masalah.....	4
I.3 Batasan Masalah .....	4
I.4 Tujuan Penelitian .....	4
I.5 Manfaat Penelitian .....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
II. 1 Biogas .....	7
II.2 Proses Pembentukan Biogas .....	9
II.2.1 Hidrolisis.....	9
II.2.2 Asidogenesis .....	10
II.2.3 Asetogenesis .....	11
II.2.4 Metanogenesis .....	11
II.3 Metode Pemisahan CO <sub>2</sub> .....	13
II.4 Mekanisme Reaksi CO <sub>2</sub> .....	25
II.4 Absorpsi CO <sub>2</sub> dalam WWC .....	29
BAB III METODE PENELITIAN .....	35
III.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	36
III.2 Rancangan Percobaan.....	36
III.2.1 Penetapan Variabel.....	36
III.2.2 Analisis Sampel.....	38
III.3 Bahan dan Alat yang Digunakan.....	38

III.4 Langkah Percobaan .....	39
III.4.1 Tahap Persiapan Bahan dan Peralatan Percobaan .....	39
III.4.2 Tahap Pelaksanaan Percobaan Absorpsi CO <sub>2</sub> .....	41
III.4.3 Analisa Sampel .....	42
III.4.3 Evaluasi Data.....	43
BAB IV HASIL PEMBAHASAN .....	49
IV.1 Sifat Fisik <i>Methyldiethanolamine</i> (MDEA) Berpromotor Asam Amino.....	49
IV.2 Pengaruh Penambahan Campuran Promotor Asam Amino pada MDEA Terhadap Laju absorpsi CO <sub>2</sub> .....	50
IV.3 Persentase Jumlah CO <sub>2</sub> Terserap.....	60
IV.4 Konstanta Laju Reaksi.....	63
APPENDIKS A .....	A-1
A.1 Menentukan Keadaan <i>steady state</i> .....	A-1
A.2 Analisa Data .....	A-1
APPENDIKS B .....	B-1
DAFTAR PUSTAKA.....	xv
DAFTAR NOTASI .....	xx

## DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1 Fase pada Sistem Pencernaan Anerobik .....	9
Gambar II. 2 Hubungan Antara Bakteri Metana dan Substansi lain dalam Daur Karbon Anaerobik (Pohlan, 1971).....	13
Gambar II. 3 Struktur kimia (a) MDEA, (b) garam <i>arginine</i> , dan (c) <i>glycine</i> (d) <i>lysine</i> .....	24
Gambar II. 4 Distribusi kecepatan <i>Wetted Wall Colum</i> (WWC).30	
Gambar III. 1 Flowchart Penelitian.....	34
Gambar III. 2 Rangkaian Alat WWC .....	40
Gambar IV. 1 Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absopsi CO <sub>2</sub> dengan variabel % berat promotor komposisi 1:1 .....	51
Gambar IV. 2 Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absopsi CO <sub>2</sub> dengan variabel % berat promotor komposisi 1:2 .....	52
Gambar IV. 3 Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absopsi CO <sub>2</sub> dengan variabel % berat promotor komposisi 2:1 .....	52
Gambar IV. 4 Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absopsi CO <sub>2</sub> dengan variabel % berat promotor komposisi 1:0 .....	53
Gambar IV. 5 Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absopsi CO <sub>2</sub> dengan variabel % berat promotor komposisi 0:1 .....	53
Gambar IV. 6 Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absopsi CO <sub>2</sub> dengan variabel 1 % berat promotor .....	55
Gambar IV. 7 Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absopsi CO <sub>2</sub> dengan variabel 5 % berat promotor .....	55
Gambar IV. 8 Pengaruh konsentrasi arginin pada campuran terhadap laju absorpsi CO <sub>2</sub> .....	56
Gambar IV. 9 Pengaruh konsentrasi glysin pada campuran terhadap laju absorpsi CO <sub>2</sub> .....	56

Gambar IV. 10 Studi Hubungan $k_{ov}$ dengan pKa beberapa macam asam amino oleh Van Holst, 2008.....	58
Gambar IV. 11 Hubungan Konstanta Reaksi <i>Overall</i> ( $k_{ov}$ ) terhadap Suhu (K) pada MDEA + 1% Berat Promotor .....	59
Gambar IV. 12 Hubungan Konstanta Reaksi <i>Overall</i> ( $k_{ov}$ ) terhadap Suhu (K) pada MDEA + 5% Berat Promotor .....	59
Gambar IV. 13 Jumlah Mol CO <sub>2</sub> Terserap dalam Satu Menit.....	61
Gambar IV. 14 Hubungan Persentase <i>Recovery</i> terhadap Suhu (K) pada MDEA + 1% berat promotor .....	62
Gambar IV. 15 Hubungan Persentase <i>Recovery</i> terhadap Suhu (K) pada MDEA + 5% berat promotor .....	63
Gambar IV. 16 Perbandingan Hubungan Nilai Konstanta (k) dengan Suhu (K) Pada Penelitian Ini.....	64
Gambar IV. 17 Perbandingan Hubungan Nilai Konstanta (k) Promotor dengan Suhu (K) Pada Beberapa Studi.....	65
Gambar IV. 18 Perbandingan Hubungan Nilai Konstanta (k) MDEA dengan Suhu (K) pada Beberapa Studi .....	65

## DAFTAR TABEL

Tabel II. 1 Komposisi Gas Rata-rata pada Sumber Gas yang Berbeda.....	7
Tabel II. 2 Solubilitas Metana dalam Air .....	8
Tabel II. 3 Enzim-enzim Penting pada Proses Hidrolisa dan Fungsinya .....	10
Tabel II. 4 Teknologi Penangkapan CO <sub>2</sub> dan Arah Pengembangannya Dimasa Depan .....	15
Tabel II. 5 Ringkasan Mengenai Pelarut yang Biasa Dipelajari dalam Proses Absorpsi Reaktif untuk Implementasi Komersial .....	19
Tabel II. 6 Penelitian Terdahulu Absorpsi Reaktif.....	31
Tabel III. 1 Variabel Bebas Percobaan.....	37
Tabel III. 2 Massa Larutan Percobaan yang Dibutuhkan .....	37
Tabel B. 1 Data Perhitungan [CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] dan [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] pada 1% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine dan Glycine</i> 1:1.....	B-1
Tabel B. 2 Data Perhitungan [CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] dan [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine dan Glycine</i> 1:2 .....	B-1
Tabel B. 3 Data Perhitungan [CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] dan [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine dan Glycine</i> 2:1 .....	B-2
Tabel B. 4 Data Perhitungan [CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] dan [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine dan Glycine</i> 1:0 .....	B-2
Tabel B. 5 Data Perhitungan [CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] dan [HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine dan Glycine</i> 0:1 .....	B-2

Tabel B. 6 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine dan Glycine</i> 1:1.....	B-3
Tabel B. 7 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine dan Glycine</i> 1:2.....	B-3
Tabel B. 8 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine dan Glycine</i> 2:1.....	B-3
Tabel B. 9 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine dan Glycine</i> 1:0.....	B-4
Tabel B. 10 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine dan Glycine</i> 0:1.....	B-4
Tabel B. 11 Data Perhitungan $[\text{CO}_3^{2-}]$ dan $[\text{HCO}_3^-]$ pada MDEA 40% berat.....	B-4
Tabel B. 12 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]$ pada 1% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine dan Glycine</i> 1:1 .....	B-5
Tabel B. 13 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]$ pada 1% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine dan Glycine</i> 1:2 .....	B-5
Tabel B. 14 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]$ pada 1% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine dan Glycine</i> 2:1 .....	B-5
Tabel B. 15 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]$ pada 1% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine dan Glycine</i> 1:0 .....	B-6
Tabel B. 16 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]$ pada 1% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine dan Glycine</i> 0:1 .....	B-6
Tabel B. 17 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]$ pada 5% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine dan Glycine</i> 1:1 .....	B-7
Tabel B. 18 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]$ pada 5% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine dan Glycine</i> 1:2 .....	B-7

Tabel B. 19 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]$ pada 5% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 2:1.....	B-7
Tabel B. 20 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]$ pada 5% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:0.....	B-8
Tabel B. 21 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]$ pada 5% berat dengan komposisi promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 0:1.....	B-8
Tabel B. 22 Data Perhitungan $[\text{OH}^-]$ dan $[\text{CO}_2^-]$ pada MDEA 40% berat.....	B-8
Tabel B. 23 Data Perhitungan Konstanta Henry berbagai variabel pada temperatur 303.15 K – 323.15 K .....	B-9
Tabel B. 24 Data Perhitungan Diffusivitas Berbagai Variabel pada Temperatur 303.15 K – 323.15 K .....	B-9
Tabel B. 25 Data Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Gas Berbagai Variabel pada Temperatur 303.15 K – 323.15 K 10	
Tabel B. 26 Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid 1% Berat Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:1.....	B-10
Tabel B. 27 Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid 1% Berat dKomposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:2....	B-11
Tabel B. 28 Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid 1% Berat Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 2:1.....	B-11
Tabel B. 29 Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid 1% Berat Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:0.....	B-11
Tabel B. 30 Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid 1% Berat Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 0:1.....	B-12
Tabel B. 31 Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid 5% Berat Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:1.....	B-12
Tabel B. 32 Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid 5% Berat Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:2.....	B-12
Tabel B. 33 Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid 5% Berat Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 2:1.....	B-13



Tabel B. 34 Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid 5% Berat Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:0.....	B-13
Tabel B. 35 Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid 5% Berat Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 0:1 .....	B-13
Tabel B. 36 Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid pada MDEA 40% berat.....	B-14
Tabel B. 37 Data Perhitungan $\phi$ (m/s) dan $k_{ov}$ (1/s) pada 1% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:1 ..	B-14
Tabel B. 38 Data Perhitungan $\phi$ (m/s) dan $k_{ov}$ (1/s) pada 1% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:2 ..	B-14
Tabel B. 39 Data Perhitungan $\phi$ (m/s) dan $k_{ov}$ (1/s) pada 1% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 2:1 ..	B-15
Tabel B. 40 Data Perhitungan $\phi$ (m/s) dan $k_{ov}$ (1/s) pada 1% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:0 ..	B-15
Tabel B. 41 Data Perhitungan $\phi$ (m/s) dan $k_{ov}$ (1/s) pada 1% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 0:1 ..	B-15
Tabel B. 42 Data Perhitungan $\phi$ (m/s) dan $k_{ov}$ (1/s) pada 5% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:1 ..	B-16
Tabel B. 43 Data Perhitungan $\phi$ (m/s) dan $k_{ov}$ (1/s) pada 5% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:2 ..	B-16
Tabel B. 44 Data Perhitungan $\phi$ (m/s) dan $k_{ov}$ (1/s) pada 5% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 2:1 ..	B-16
Tabel B. 45 Data Perhitungan $\phi$ (m/s) dan $k_{ov}$ (1/s) pada 5% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:0 ..	B-17
Tabel B. 46 Data Perhitungan $\phi$ (m/s) dan $k_{ov}$ (1/s) pada 5% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 0:1 ..	B-17
Tabel B. 47 Data Perhitungan $\phi$ (m/s) dan $k_{ov}$ (1/s) pada MDEA 40% Berat .....	B-17
Tabel B. 48 Data Perhitungan $k_{MDEA}$ dan $k_{[OH^-]}$ .....	B-17
Tabel B. 49 Data Perhitungan $k_{apparence}$ pada Konsentrasi 1% Berat Promotor pada Temperatur 303.15 – 333.15 K .....	B-18

Tabel B. 50 Data Perhitungan <i>k<sub>apparence</sub></i> pada Konsentrasi 5% Berat Promotor pada Temperatur 303.15 – 333.15 K.....	B-18
Tabel B. 51 Data Perhitungan Resim Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:1..	B-19
Tabel B. 52 Data Perhitungan Resim Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:2..	B-19
Tabel B. 53 Data Perhitungan Resim Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 2:1..	B-19
Tabel B. 54 Data Perhitungan Resim Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:0..	B-20
Tabel B. 55 Data Perhitungan Resim Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 0:1..	B-20
Tabel B. 56 Data Perhitungan Resim Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:1..	B-20
Tabel B. 57 Data Perhitungan Resim Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:2..	B-21
Tabel B. 58 Data Perhitungan Resim Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 2:1..	B-21
Tabel B. 59 Data Perhitungan Resim Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 1:0..	B-21
Tabel B. 60 Data Perhitungan Resim Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor <i>Arginine</i> dan <i>Glycine</i> 0:1..	B-22
Tabel B. 61 Data Perhitungan Resim MDEA 40% Berat.....	B-22



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **I.1 Latar Belakang**

Saat ini, pemanasan global oleh karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) merupakan masalah serius yang salah satunya diakibatkan oleh hasil pembakaran bahan bakar fosil. Hal ini merupakan salah satu tantangan bagi kita untuk dapat mengembangkan dan memanfaatkan sumber energi terbarukan yang diharapkan mampu mengurangi efek pemanasan global akibat gas  $\text{CO}_2$  (Ariani dkk., 2013). Sumber energi terbarukan yang berasal dari biomassa memiliki potensi besar untuk dikembangkan dalam rangka memenuhi kebutuhan energi masa depan, salah satunya biogas (Tippayawong dkk., 2010). Biogas yang dihasilkan melalui teknologi fermentasi merupakan salah satu solusi atas permasalahan saat ini, yang sebagian besar bahan baku pembuatannya terdapat pada negara agraris (Ariani dkk., 2013) contohnya China, Indonesia, Thailand, dan Amerika ([www.investopedia.com](http://www.investopedia.com)). Penggunaan biogas sebagai sumber energi terbarukan sangat memperhatikan keseimbangan sistem produksi dengan lingkungan hidup yang membandingkannya dengan bahan bakar tidak terbarukan (Elizabeth dkk., 2011). Biogas dapat diproduksi dari berbagai sumber bahan organik, seperti limbah domestik, limbah industri, limbah pertanian, atau limbah perkotaan. Komposisi biogas bervariasi tergantung pada sumber produksinya, sekitar 50-75% metana ( $\text{CH}_4$ ), 25-50%  $\text{CO}_2$ , 0-1% hidrogen sulfida ( $\text{H}_2\text{S}$ ), 0-10%  $\text{N}_2$  dan air (Morero dkk., 2016).

Kandungan  $\text{CH}_4$  dalam biogas menentukan nilai bakar ketika dikonversi ke nilai energi yang dihasilkan. Kandungan lain seperti  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  yang terdapat pada biogas dianggap sebagai pengotor yang harus dihilangkan. Kandungan  $\text{CO}_2$  merupakan gas inert yang perlu dihilangkan untuk meningkatkan nilai bakar biogas itu sendiri. Sedangkan  $\text{H}_2\text{S}$  pada biogas dapat

menyebabkan kerusakan pada alat karena bersifat korosif (Abdeen, 2016). Untuk itu, perlu ada peningkatan kualitas biogas dengan menghilangkan kandungan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S pada biogas yang mana salah satu teknologi untuk menghilangkan kandungan CO<sub>2</sub> tersebut adalah absorpsi disertai reaksi kimia (Yousef dkk., 2016). Teknologi absorpsi disertai reaksi kimia (reaktif) adalah absorpsi di mana komponen dari gas akan berikatan atau bereaksi dengan zat yang ada dalam solven (Sediawan, 2000) yang memiliki keuntungan yaitu tingginya muatan CO<sub>2</sub>. Dibandingkan dengan teknologi membran dan destilasi kriogenik, absorpsi reaktif cenderung memiliki *capital cost* yang lebih rendah.

Beberapa solvent yang sering digunakan pada absorpsi reaktif yaitu Ammonia dan *Potassium carbonate* (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), dimana ammonia memiliki kekurangan yaitu membutuhkan suhu absorber kurang dari 60°C untuk mencegah terbentuk *ammonium bicarbonate* dan mempunyai volatilitas yang tinggi sehingga mudah menguap (Olajire, A.A., 2010). Sedangkan K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> korosif terhadap *carbon steel* dan membutuhkan promotor senyawa amine seperti *piperazine* atau pelarut dengan temperatur tinggi (lebih dari 75°C) untuk meningkatkan laju perpindahan massa CO<sub>2</sub> (Faiz, R. Dkk., 2011). Selain itu, senyawa alkanolamine seperti *diisopropanolamine* (DIPA), *2-Amino-2-methyl-1-propanol* (AMP), *monoethanolamine* (MEA), *diethanolamine* (DEA), *methyldiethanolamine* (MDEA) juga sering digunakan untuk mengabsorb CO<sub>2</sub>. Masing-masing solvent tersebut juga masih memiliki kekurangan. DIPA memiliki kekurangan yaitu mempunyai kecepatan reaksi yang sedang terhadap CO<sub>2</sub> (Aroonwilas dkk., 2004). AMP memiliki daya absorpsi yang kurang dibandingkan dengan MEA (Abhodeir dkk., 2006). Sedangkan MEA memiliki kekurangan pada daya muat CO<sub>2</sub> yang terbatas, mudah terdegradasi melalui reaksi *irreversible* oleh CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub>, dan memiliki banyak permasalahan pada operasionalnya seperti *foaming*, *fouling*, bertambahnya viskositas serta korosi pada alat. DEA memiliki kekurangan pada daya muat CO<sub>2</sub> yang terbatas dan rentan terhadap korosi dan degradasi. Sedangkan

MDEA hanya memiliki kekurangan yaitu rendahnya kinetika absorpsi terhadap CO<sub>2</sub> (Tan dkk., 2012). Selain itu, MDEA memiliki banyak keuntungan, diantaranya adalah memiliki muatan CO<sub>2</sub> yang besar di dalam MDEA dibandingkan dengan MEA dan DEA dengan pengikatan CO<sub>2</sub> menjadi karbonat (Barzagli dkk., 2010), panas yang dibutuhkan untuk reaksi dengan gas asam rendah sehingga membutuhkan energi yang rendah pada regenerasinya (Dave dkk., 2009), degradasi larutan yang rendah dibandingkan MEA dan DEA (Aroonwilas dkk., 2004), dan tidak korosif terhadap baja karbon (Bishnoi dkk., 2000).

Kekurangan yang ada pada MDEA dapat di rekayasa dengan menambahkan promotor pada larutan MDEA itu sendiri. Penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan Sema dkk. (2012), mempelajari bahwa MDEA yang diberi promotor MEA dapat meningkatkan kinetika reaksinya dengan campuran MDEA-MEA optimum sebesar 23-7 (%berat). Benamor dkk. (2016), mempelajari bahwa campuran MDEA-Glysin dapat meningkatkan kinetika reaksi dan menurunkan energi aktivasi karena asam amino mengandung gugus amin yang juga terdapat pada MDEA. Fang dkk. (2015), mempelajari bahwa campuran MEA dengan satu jenis asam amino (proline, sarkosine, glisin, alanin, teonin) dapat meningkatkan kinetika reaksi absorpsi yang ditandai dengan meningkatkan total tekanan pada alat yang digunakan.

Penentuan nilai kinetika reaksi absorpsi sangat penting dalam aplikasinya pada skala industri. Pada skala industri, nilai kinetika reaksi akan digunakan dalam desain absorber yang akan dioperasikan. Nilai kinetika reaksi yang besar sangat penting untuk mengurangi ukuran desain absorber yang akan dibuat. (Van Holst, 2008) Hal ini tentunya akan memberikan keuntungan secara ekonomi pada penerapannya secara nyata. Untuk itu, perlu diteliti pengaruh dari campuran asam amino sebagai promotor pada reaksi absorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan absorben MDEA.

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas, dapat dirumuskan beberapa masalah yaitu perlunya penambahan promotor pada absorben MDEA untuk dapat meningkatkan kinetika reaksinya terhadap CO<sub>2</sub> serta kondisi operasi optimumnya. Asam amino terbukti dapat meningkatkan kinetika reaksi terhadap CO<sub>2</sub> jika ditambahkan sebagai promotor. Sehingga perlu dipelajari efek penambahan campuran dua macam asam amino terhadap kinetika reaksi absorpsi CO<sub>2</sub> oleh MDEA. Asam amino yang akan digunakan pada percobaan ini adalah glycine dan arginine dengan komposisi dan kondisi operasi tertentu.

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Proses pemisahan CO<sub>2</sub> dilakukan dengan menggunakan campuran gas sintetis (CO<sub>2</sub> dan nitrogen sintetis) dimana N<sub>2</sub> sebagai gas inert menggantikan CH<sub>4</sub>.
2. Beberapa properti thermodinamika, parameter fisik seperti kelarutan CO<sub>2</sub> dalam *solvent* dan data-data kimia-fisika *solvent* yang digunakan diperoleh dari hasil studi literatur sebelumnya.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan kinetika reaksi absorpsi MDEA berpromotor campuran glycine dan arginine.
2. Menentukan komposisi campuran glycine dan lysine serta suhu operasi terbaik untuk kinetika absorpsi MDEA berpromotor glycine dan arginine.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat Penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memperoleh data kinetika reaksi absorpsi MDEA yang berguna untuk perhitungan *scale up* alat.

2. Mengetahui masing-masing kinetika reaksi dari absorben MDEA berpromotor glycine dan arginine pada variabel komposisi campuran tertentu.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### II. 1 Biogas

Biogas merupakan produk utama dari digester anaerobik yang sebagian besar terdiri dari metana ( $\text{CH}_4$ ) dan karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ). Berdasarkan sumbernya, komposisi biogas dapat dilihat pada Tabel 2.1 dengan komposisi  $\text{CH}_4$  terbesar adalah pada biogas sebanyak 70–90% dan gas alam sebanyak 90%. Salah satu kekurangan dari gas yang bersumber dari biogas adalah kandungan  $\text{H}_2\text{S}$  dan  $\text{CO}_2$  yang masih tinggi dari pada yang bersumber dari gas alam.

**Tabel II. 1** Komposisi Gas Rata-rata pada Sumber Gas yang Berbeda

Gas	Biogas	Landfill Gas	Natural Gas
$\text{CH}_4$ (%)	70-90	65-65	90
Hydrocarbon (%)	0	0	9
$\text{H}_2$ (%)	0	0-3	0
$\text{CO}_2$ (%)	30-40	15-50	1
$\text{N}_2$ (%)	0.2	5-40	0.3
$\text{O}_2$ (%)	0	0-5	0
$\text{H}_2\text{S}$ (ppm)	0-4000	0-100	3
$\text{NH}_3$	100	5	0
Heating value, ( $\text{kWh/Nm}^3$ )	6.5	4.4	11.0

Sumber: Grande, 2007

Gas metana secara fisik memiliki sifat-sifat sebagai berikut:

Berat molekul : 16,04 gram/mol

Densitas :  $7,2 \times 10^{-4}$  gram/ ml (pada 1 atm dan  $0^\circ\text{C}$ )

Titik didih : -161,4 °C  
 Titik leleh : -182,6 °C  
 Nilai kalor CH<sub>4</sub> : 13.279,302 Kkal/kg (Fessenden, 1989)  
 Nilai kalor biogas : 6.720 – 9660 Kkal/kg (Harasimowicz dkk., 2007)  
 d<sub>p</sub> : 3,8 °A (Wen-Hui Lin dkk., 2001)  
 T<sub>c</sub> : 109,4 K (Pabby dkk., 2009)

Solubilitas metana dalam air dapat dilihat dalam Tabel 2.2 sebagai berikut:

**Tabel II. 2 Solubilitas Metana dalam Air**

T, °C	0	5	10	15	20	25	30	35
10 <sup>-4</sup> x H	2,24	2,59	2,97	3,37	3,76	4,13	4,49	4,86

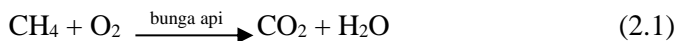
  

T, °C	40	45	50	60	70	80	90	100
10 <sup>4</sup> x H	5,20	5,51	5,77	6,26	6,66	6,82	6,92	7,01

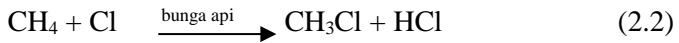
Sumber: Perry, 1997

Sedangkan untuk sifat kimia metana berdasarkan Fessenden, (1989) adalah sebagai berikut:

Reaksi pembakaran sempurna gas metana menghasilkan gas karbondioksida dan uap air.

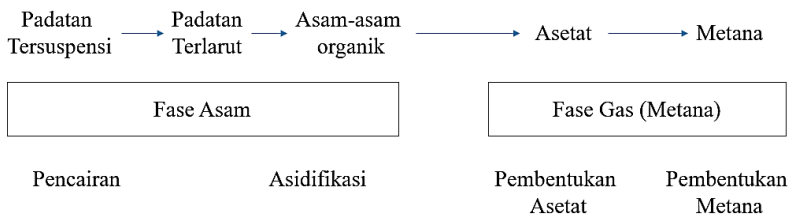


Reaksi halogenasi gas metana menghasilkan klorometana dan HCl



## II.2 Proses Pembentukan Biogas

Biogas dihasilkan dari proses metabolisme konsorsium bakteri yang masing-masing memiliki peran untuk tahapan pembentukan biogas. Ada 4 (empat) tahap proses pembentukan biogas, yaitu: Hidrolisis → Asidifikasi → Asetogenesis → Metanogenesis (Adekunle, 2015). Keempat tahap tersebut terjadi pada kondisi anorganik yang dapat dibagi menjadi 2 fase seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.1. Empat tahap proses diatas terjadi berkesinambungan dan sinergis, dimana proses metanogenesis mengontrol kecepatan pembentukan metana, karena laju reaksinya sangat lambat dibandingkan proses acidogenesis.



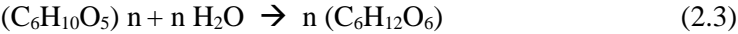
**Gambar II. 1** Fase pada Sistem Pencernaan Anerobik

(Sumber: Diadaptasi dari US EPA Biosolids Technology Factsheet, 2006)

### II.2.1 Hidrolisis

Tahap pertama dari proses pencernaan anaerobik adalah hidrolisis padatan (partikulat dan limbah koloid) untuk menghasilkan senyawa organik terlarut (asam volatil dan alkohol) sederhana (Gerardi, 2003). Proses hidrolisis melibatkan peran enzim ekstraseluler yang mampu merubah bahan organik yang tidak larut dan komponen yang memiliki berat molekul lebih besar seperti lipid, polisakarida, protein, lemak, dan asam nukleat menjadi material organik mudah larut seperti monosakarida, asam

amino dll. yang berperan sebagai sumber energi dan protein (Adekunle, 2015). Reaksi hidrolisis yang umum terjadi adalah sebagai berikut:



Mikroorganisme yang berperan dalam proses hidrolisis adalah bakteri-bakteri *strict anaerob* seperti *Bactericides*, *Clostridia* dan *facultative anaerob* seperti *Streptococcus* (Yadvika dkk., 2004). Sedangkan enzim yang penting dalam proses hidrolisa disajikan pada Tabel 2.3.

**Tabel II. 3** Enzim-enzim Penting pada Proses Hidrolisa dan Fungsinya

Enzim	Substrat	Produk Pemecahan
Proteinase	Protein	Asam amino
Selulase	Selulosa	Selobiosa dan glukosa
Amilase	Pati	Glukosa
Lipase	Lemak	Asam lemak dan gliserol
Pektinase	Pektin	Gula-gula, seperti galaktosa, arabinosa dan asam pectin

Sumber: Schnurer, A. and Jarvis, A. (2009)

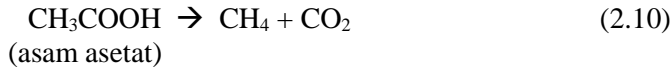
### II.2.2 Asidogenesis

Pada proses ini bakteri *acidogenic* (bakteri penghasil asam) memecah molekul gula menjadi *volatil fatty acid* misalnya laktat, butirat, propionat, dan asetat, juga terbentuk CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S dan H<sub>2</sub> (Grande, 2007). Jenis reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:

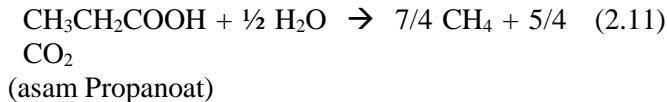




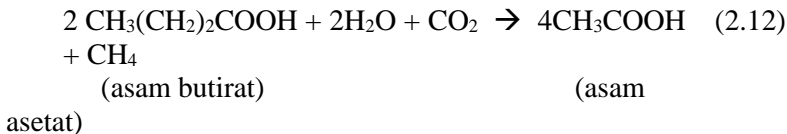
- (b) *Acetrophic metanogens*, disebut juga *acetoclastic* atau metanogen yang memecah asam asetat menjadi metana dan CO<sub>2</sub> oleh bakteri *Methanosarcina Sp* dan *Methanothrix Spp*.



- (c) Pembentukan metana dari asam propionate yang bereaksi dengan air

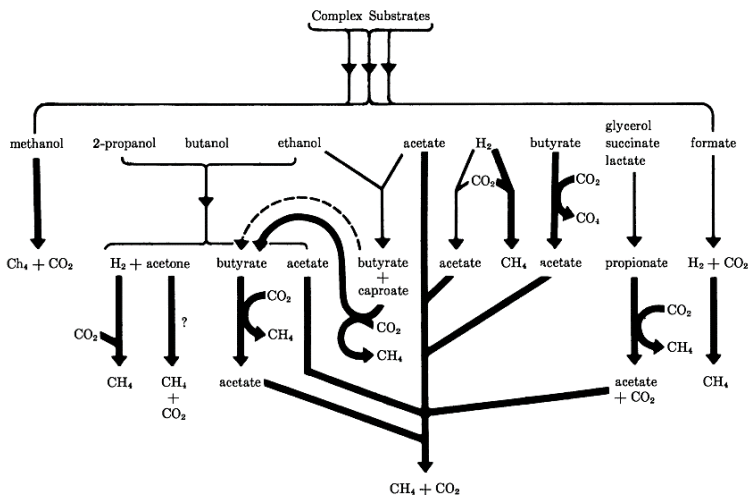


- (d) Proses metanogenesis dengan reaksi antara asam butirat dengan air dan karbondioksida



Jumlah gas metana yang dihasilkan pada proses pembentukan biogas sangat bergantung pada faktor fisis (pH, temperatur) dan biologis (bahan organik, bakteri). Bakteri *methanogen* sangat cocok pada pH netral sampai basa dan sangat sensitif terhadap perubahan. Bakteri pembentuk metana dapat beroperasi dalam kondisi mesopilik (293-313°K/25–40°C) dan kondisi termofilik (323-333°K / 50-65°C) (Gavala, dkk., 2003). Kondisi mesofilik berfungsi secara optimal pada suhu antara 30-35°C. Gas yang dihasilkan dalam proses dibiodigester selain metana adalah karbondioksida CO<sub>2</sub>, senyawa sulfur (H<sub>2</sub>S), sikloalkana, air, dan kontaminan kecil (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, Cl<sub>2</sub>, F<sub>2</sub>, dll) (Wellinger, 2009). Namun, Komposisi akhir dari biogas

tergantung dari variable dan material organik yang dipakai dalam proses (Pettersson dan Wellinger, 2009). Pada Gambar 2.2 menunjukkan bahwa setelah bahan/substrat kompleks diuraikan menjadi asam-asam mudah menguap (asam butirat, propanoat) oleh beberapa bakteri seperti *propionibacteria*, *clostridia*, *butyribacteria*, dan bakteri lainnya (Pohlan, 1971), maka asam-asam tersebut dirubah menjadi asam asetat (asam paling sederhana) untuk menjadi produk akhir berupa gas  $\text{CH}_4$ , dan  $\text{CO}_2$ .



**Gambar II. 2** Hubungan Antara Bakteri Metana dan Substansi lain dalam Daur Karbon Anaerobik (Pohlan, 1971)

### II.3 Metode Pemisahan $\text{CO}_2$

Rao dan Rubin (2002), mengungkapkan ada beberapa teknologi untuk memisahkan dan menangkap  $\text{CO}_2$  seperti: proses cryogenic (pendinginan), teknologi membran, adsorpsi, dan absorpsi. Masing-masing teknologi tersebut memiliki tantangan yang menarik dalam pengembangannya dimasa depan (lihat Tabel 2.11).



Metode absorpsi adalah metode pemisahan yang paling ekonomis untuk memisahkan CO<sub>2</sub> dari aliran gas. Absorpsi CO<sub>2</sub> dengan larutan kimia atau fisika adalah teknologi yang dikembangkan dengan baik dan telah diaplikasikan pada berbagai proses komersial, termasuk pemurnian gas dan produksi amoniak (Wang dkk, 2011).

Secara umum, proses absorpsi diawali dengan penyerapan gas ke dalam liquida melalui interface. Dikenal dua macam absorpsi, yaitu:

**1. Absorpsi fisik**

Proses absorpsi atau perpindahan gas (difusi) kedalam absorben tanpa disertai dengan reaksi kimia.

**2. Absorpsi kimia**

Pada proses ini, perpindahan gas (difusi) disertai dengan reaksi antara gas dan absorben. Reaksi kimia dapat terjadi secara reversible dan irreversible dengan reaksi orde satu, orde dua dan seterusnya tergantung dari jumlah molekul yang bereaksi yang konsentrasinya berubah sebagai hasil dari reaksi kimia.

Absorpsi disertai dengan reaksi kimia telah mendapatkan perhatian yang serius dalam proses industri kimia. Proses absorpsi reaktif (Reactive Absorption Processes/ RAP) adalah proses yang menggabungkan mekanisme reaksi kimia dan absorpsi dalam satu unit. Secara umum, absorpsi reaktif dikenal sebagai penyerapan gas dalam medium liquid dengan reaksi kimia. Proses tersebut memiliki beberapa keuntungan, dimana dalam proses tersebut dapat meningkatkan yield reaksi dan selectivity, mengatasi hambatan termodinamika seperti reduksi dalam konsumsi energi, air, dan pelarut. Oleh karena adanya interaksi antara reaksi kimia dan perpindahan massa dan panas yang cukup kompleks (Gorak, 2005).

**Tabel II. 4** Teknologi Penangkapan CO<sub>2</sub> dan Arah Pengembangannya Dimasa Depan

<b>Teknologi</b>	<b>Aplikasi industri</b>	<b>Isu-isu penting untuk aplikasi skala besar</b>	<b>Kebutuhan masa depan</b>
<b>Absorpsi</b>	CO <sub>2</sub> <i>removal</i> dari gas buang. Pemurnian gas alam.	Kebutuhan energi untuk regenerasi. Pre-treatment gas asam lainnya.	Peningkatan desain proses. Pelarut dengan kapasitas penyerapan CO <sub>2</sub> tinggi dan energi regenerasi rendah. Absorber memutar
<b>Membran</b>	Pemisahan CO <sub>2</sub> pada produksi H <sub>2</sub> . Pemurnian gas alam.	Selektivitas CO <sub>2</sub> . Degradasi / masalah pengotoran.	Cross-linking matriks campuran membran untuk mendapatkan peningkatan permeabilitas dan selektivitas.
<b>Distilasi kriogenik</b>	Pencairan CO <sub>2</sub> dari sumur gas.	Pendinginan <0 °C. <i>Pre-treatment</i> untuk kotoran yang membeku diatas suhu operasi (misalnya H <sub>2</sub> S).	Proses hibrid. Integrasi dengan proses penyerapan. Siklus pendinginan efisien.
<b>Adsorpsi</b>	Pemisahan CO <sub>2</sub> dalam produksi H <sub>2</sub> . Pemurnian gas alam.	Adsorben cenderung memiliki kapasitas rendah / selektivitas. Energi yang besar untuk regenerasi.	Adsorben baru yang menyerap CO <sub>2</sub> dari bahan yang mengandung uap air. Absorbent berbasis karbon.

Teknologi	Aplikasi industri	Isu-isu penting untuk aplikasi skala besar	Kebutuhan masa depan
		Waktu siklus yang panjang.	

Perpindahan massa disertai reaksi kimia terjadi bila dua fasa tak berada dalam kesetimbangan kimia dikontakkan satu sama lain. Fenomena ini terdiri atas beberapa tahap elementer berikut:

- (a) Difusi satu reaktan dari badan gas ke bidang batas antar fasa gas-liquida.
- (b) Difusi reaktan dari *interface* ke badan fasa liquida.
- (c) Reaksi kimia di dalam fasa liquida.
- (d) Difusi reaktan yang semula ada di dalam badan fasa liquida dan/atau produk reaksi didalam fasa liquida, akibat gradien konsentrasi yang terbentuk oleh reaksi kimia.

### II.3.1 Pemilihan Pelarut Pada Proses Absorpsi

Pemilihan pelarut umumnya dilakukan sesuai dengan tujuan absorpsi, antara lain :

- Jika tujuan utama adalah untuk menghasilkan larutan yang spesifik, maka pelarut ditentukan berdasarkan sifat dari produk
- Jika tujuan utama adalah untuk menghilangkan kandungan tertentu dari gas, maka ada banyak pilihan pelarut. Misalnya air, dimana merupakan pelarut yang paling murah dan sangat kuat untuk senyawa polar.

Terdapat beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan jenis pelarut, yaitu kelarutan gas, volatilitas, korosivitas, harga, ketersediaan, viskositas, dan lain sebagainya. *Alkanolamine* dapat diklasifikasikan menjadi tiga berdasarkan struktur kimianya, yaitu *primary amine*, *secondary amine* dan *tertiary amine*. *Primary amine* memiliki satu rantai alkanol dan dua atom hidrogen yang terikat atom nitrogen, contohnya adalah *Methylethanolamine* (MEA). *Secondary amine* memiliki dua rantai atom alkanol dan satu atom hidrogen yang terikat atom

nitrogen, contohnya adalah *Diethanolamine* (DEA) dan *Triethanolamine* (TEA). *Tertiary amine* tidak memiliki atom hidrogen, secara langsung terikat atom nitrogen, contohnya adalah *Methyldiethanolamine* (MDEA) (Wang dkk, 2011; Yildirim dkk, 2012). Rangkuman mengenai larutan yang digunakan dalam penelitian absorpsi dapat dilihat pada **Tabel II.5**.

**Tabel II. 5** Ringkasan Mengenai Pelarut yang Biasa Dipelajari dalam Proses Absorpsi Reaktif untuk Implementasi Komersial

Pelarut	Keuntungan	Kerugian
<b>Monoethanolamine (MEA)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reaktivitas yang tinggi dan tingkat penyerapan yang cepat, yang memungkinkan penyerapan berlangsung dalam kolom pendek.</li> <li>• Rendahnya penyerapan hidrokarbon.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kapasitas CO<sub>2</sub> <i>loading</i> yang rendah karena formasi karbamat yang stabil.</li> <li>• Degradasi melalui reaksi samping ireversibel dengan CO<sub>2</sub> dan O<sub>2</sub>.</li> <li>• Masalah operasional seperti kehilangan pelarut, berbusa, pengotoran, peningkatan nilai viskositas dan korosi.</li> </ul>
<b>Diethanolamine (DEA)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reaktivitas tinggi dan tingkat penyerapan cepat.</li> <li>• Karbamat dari DEA tidak stabil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kapasitas penyerapan CO<sub>2</sub> yang terbatas</li> <li>• Rawan sampai batas tertentu terhadap bahaya korosi dan degradasi pelarut.</li> </ul>
<b>Methyldiethanolamine (MDEA)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO<sub>2</sub> <i>loading</i> lebih tinggi dibandingkan dengan MEA dan DEA karena</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kinetika penyerapan lambat dengan CO<sub>2</sub>.</li> </ul>

Pelarut	Keuntungan	Kerugian
	<p>pembentukan ion bikarbonat bukan karbamat.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memerlukan panas reaksi yang rendah dengan gas asam yang sehingga kebutuhan energy regenerasi kecil.</li> <li>• Laju degradasi pelarut lebih rendah dibandingkan MEA dan DEA.</li> <li>• Tidak korosif terhadap baja karbon.</li> </ul>	
<b>Diisopropanolamine (DIPA)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kurang korosif dari MEA atau DEA.</li> <li>• Membutuhkan lebih sedikit panas dalam regenerasi larutannya.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Memiliki laju reaksi moderat dengan CO<sub>2</sub> dan rentan terhadap korosi dan degradasi pelarut pada rentang tertentu.</li> <li>• Memiliki selektivitas yang lebih besar untuk H<sub>2</sub>S atau CO<sub>2</sub>.</li> </ul>
<b>2-Amino-2-methyl-1-</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kapasitas CO<sub>2</sub> <i>loading</i> lebih</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tingkat penyerapan lebih</li> </ul>

<b>Pelarut</b>	<b>Keuntungan</b>	<b>Kerugian</b>
<b>propanol (AMP)</b>	tinggi untuk MEA. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Membutuhkan konsumsi energi yang relatif rendah untuk regenerasi pelarut.</li> </ul>	rendah dibandingkan MEA.
<b>Piperazine (PZ)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistensi degradasi Tinggi.</li> <li>• Kapasitas CO<sub>2</sub> lebih tinggi dibandingkan dengan MEA.</li> <li>• Reaksi CO<sub>2</sub> dengan piperazine jauh lebih cepat dibandingkan dengan pembentukan karbamat-amin konvensional seperti MEA dan DEA.</li> <li>• Tahan terhadap panas degradasi hingga 150 °C.</li> <li>• Tahan terhadap degradasi oksidatif.</li> <li>• Kurang stabil dari pada MEA.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konsentrasi tinggi dalam larutan tidak mungkin karena keterbatasan nilai kelarutannya dalam air. Oleh karena itu, biasanya digunakan sebagai promotor untuk sistem amina untuk meningkatkan kecepatan transfer massa CO<sub>2</sub>.</li> </ul>
<b>Ammonia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kapasitas penyerapan yang tinggi dan tingkat penyerapan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suhu di absorber harus lebih rendah dari 60 °C untuk</li> </ul>



Pelarut	Keuntungan	Kerugian
	<p>cepat.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Garam yang terbentuk dari reaksi dengan CO<sub>2</sub> dapat digunakan sebagai pupuk komersial.</li> <li>Kebutuhan energi rendah pada proses regenerasi pelarut.</li> <li>Resistensi terhadap degradasi oksidatif dan termal.</li> </ul>	<p>mencegah dekomposisi amonium bikarbonat (produk samping dari reaksi dengan CO<sub>2</sub>).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Sangat stabil dan sering memberikan amonia tergelincir ke dalam gas yang keluar.</li> </ul>
<b>Potassium carbonate (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Secara signifikan enthalpy penyerapannya rendah dibandingkan pelarut amina.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Membutuhkan promotor amina seperti piperazine / pelarut dengan suhu tinggi hingga 75°C untuk secara signifikan meningkatkan laju transfer massa.</li> <li>Korosif terhadap baja karbon; memerlukan bahan penghambat korosi.</li> </ul>

Keunggulan senyawa *alkanolamine* dalam menyerap gas CO<sub>2</sub> adalah laju absorpsi cepat dan biaya pelarut murah. Namun terdapat beberapa kelemahan senyawa *amine* seperti panas absorpsi tinggi, tidak dapat memisahkan senyawa-senyawa mercaptan, konsumsi energi untuk regenerasi pelarut cukup tinggi, dan bersifat korosif.

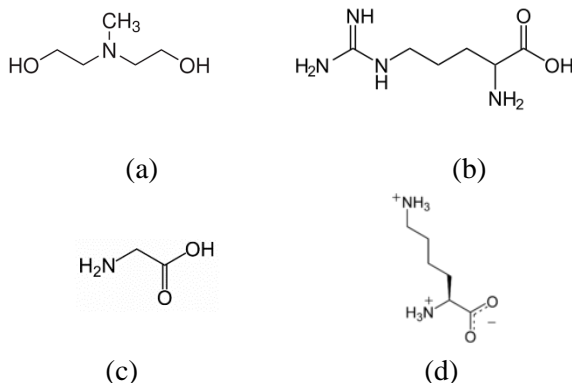
Penelitian ini menggunakan larutan MDEA dengan promotor asam amino. Larutan MDEA digunakan karena memiliki beberapa keuntungan yaitu energi yang dibutuhkan kecil, kapasitas penyerapan dan stabilitas yang tinggi. Namun larutan MDEA ini memiliki kekurangan yaitu kecepatan reaksi yang rendah. Maka dari itu digunakan asam amino campuran sebagai promotor. Pada percobaan ini digunakan asam amino campuran berupa glycine dan arginine. Penggunaan promotor ini dapat menaikkan laju reaksi tanpa menghilangkan keuntungan dari penggunaan larutan MDEA itu sendiri.

Adapun laju reaksi CO<sub>2</sub> yang terabsorpsi pada larutan campuran *potassium carbonate* (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) dengan berpromotor *arginine* sebelumnya telah dipelajari (Shen, 2013). *Arginine* memiliki gugus amino primer dan gugus guanidium. Gugus guanidine adalah gugus yang bermuatan positif pada kondisi asam, netral, dan basa lemah. Promotor senyawa *amine* seperti *arginine* dipilih karena *arginine* merupakan asam amino primer yang dapat membentuk garam asam amino alkalin. Garam asam amino ini diprediksikan sebagai salah satu zat cukup baik dalam absorpsi CO<sub>2</sub> karena memiliki gugus fungsional yang identik dengan *alkanolamines*. Dalam hal ini garam asam amino diprediksi akan bereaksi dengan CO<sub>2</sub> dengan cara yang sama. Oleh karena itu, *arginine* diprediksikan akan bereaksi dengan CO<sub>2</sub> pada gugus amino primernya.

*Arginine* adalah suatu asam amino esensial yang memiliki kelompok guanidium bermuatan positif. Untuk tugas ini *arginine* dipilih sebagai promotor untuk mengabsorpsi CO<sub>2</sub> dalam larutan MDEA. *Arginine* mengandung grup amino primer dan guanidium grup pada rantai sampingnya. Amino grup primer (*arginine*) dan

amina tersier (MDEA) diprediksi dapat bereaksi dengan  $\text{CO}_2$  dengan cara yang sama.

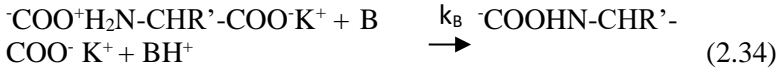
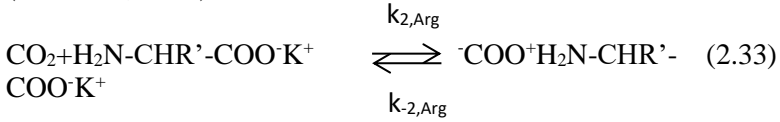
*Glycine* merupakan senyawa garam amina primer yang memiliki satu gugus  $\text{NH}_2$  dan gugus asam karboksilat. *Glycine* mempunyai stabilitas tinggi terhadap oksigen sehingga tidak mudah terdegradasi oleh oksigen serta memiliki kecepatan reaksi dengan  $\text{CO}_2$  yang tinggi. Berikut adalah struktur kimia dari *arginine* ( $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{N}_4\text{O}_2$ ), MDEA ( $\text{CH}_3\text{N}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OH})_2$ ), dan *glycine*.



**Gambar II. 3** Struktur kimia (a) MDEA, (b) garam *arginine*, dan (c) *glycine* (d) *lysine*

Reaksi antara  $\text{CO}_2$  dan asam amino dapat dijelaskan berdasarkan mekanisme zwitterionik (Holst dkk, 2009; Vaidya dkk, 2010; Kim dkk, 2012; Paul dan Thomsen, 2012; Kumar dkk, 2003; Jing dkk, 2012). Merujuk pada mekanisme zwitterion,  $\text{CO}_2$  bereaksi dengan garam asam amino membentuk zwitterion sebagai intermediate yang kemudian akan dideprotonasi oleh suatu basa, B (seperti  $\text{KR}'\text{NH}_2$ , gugus *guanidine* pada rantai samping *arginine*,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$ , atau  $\text{H}_2\text{O}$ ). Dapat diketahui dari penelitian

tersebut reaksi antara  $\text{CO}_2$  dan *arginine* adalah sebagai berikut (Shen dkk, 2013):



Adapun dengan mengasumsi kondisi *quasi-steady state* pada bagian zwitterion dan dengan mengasumsi reaksi transfer proton kedua *reversible*, maka laju reaksi  $\text{CO}_2$  dalam larutan *arginine aqueous* dapat didefinisikan sebagai :

$$r_{\text{CO}_2-\text{KArg}} = \frac{k_{2\text{ arg}}}{1 + \frac{k_{-2\text{ arg}}}{\sum_i k_{Bi} [Bi]}} \times [\text{CO}_2][\text{KArg}] \quad (2.35)$$

$$r_{\text{CO}_2-\text{KArg}} = k_{arg} \times [\text{CO}_2][\text{KArg}] \quad (2.36)$$

(Shen dkk, 2013)

## II.4 Mekanisme Reaksi $\text{CO}_2$

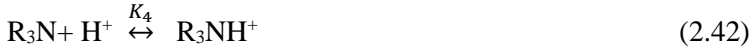
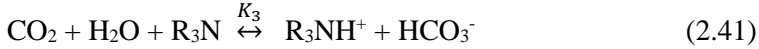
### II.4.1 Kinetika Reaksi Absorpsi $\text{CO}_2$

Ketika  $\text{CO}_2$  terserap dalam larutan MDEA ( $\text{R}_3\text{N}$ ) maka akan terjadi reaksi stoikiometri sebagai berikut (Haimour dan Sandall, 1984).



Di dalam larutan terjadi reaksi-reaksi kesetimbangan sebagai berikut.





Dimana,

$$K_w = [\text{H}^+][\text{OH}^-] ; K_1 = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{[\text{CO}_2]} ; K_2 = \frac{[\text{CO}_3^{2-}][\text{H}^+]}{[\text{HCO}_3^-]} ;$$

$$K_3 = \frac{[\text{R}_3\text{NH}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2][\text{R}_3\text{N}]} ; \text{ dan } K_4 = \frac{[\text{R}_3\text{NH}^+]}{[\text{R}_3\text{N}][\text{H}^+]}$$

- Dari reaksi kesetimbangan diatas, dapat ditentukan nilai  $[\text{OH}^-]$  dan  $[\text{CO}_2]_e$  sebagai berikut (Yi dkk, 2009) :

$$[\text{OH}^-] = \frac{K_w}{K_2} \frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} \quad (2.43)$$

$$[\text{CO}_2]_e = \frac{K_2 K_4}{K_3} \frac{[\text{HCO}_3^-]^2}{[\text{CO}_3^{2-}]} \quad (2.44)$$

- Nilai  $K_w$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ , dan  $K_4$  didapat dari persamaan berikut :

$$K_w = \exp\left(39,555 - \frac{9,879 \times 10^4}{T} + \frac{5,6883 \times 10^7}{T^2} - \frac{1,465 \times 10^{10}}{T^3} + \frac{1,3615 \times 10^{12}}{T^4}\right) \quad (2.45)$$

(Yi dkk, 2009; Kent dan Eisenberg, 1976)

$$K_1 = 10^{-\frac{3404,7}{T} + 6,966 \times 10^{14} - 10^{0,03279T}} \quad (2.46)$$

(Yi dkk, 2009; Danckwerts dan Sharma, 1966)

$$K_2 = \exp \left( -294,74 + \frac{3,6439 \times 10^5}{T} - \frac{1,8416 \times 10^8}{T^2} + \frac{4,1579 \times 10^{10}}{T^3} - \frac{3,5429 \times 10^{12}}{T^4} \right)$$

(Yi dkk, 2009; Kent dan Eisenberg 1976)

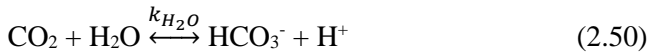
$$K_4 = e^{\left(32,259 - \frac{0,0424}{T}\right)} \quad (2.48)$$

(Xu dkk, 2003)

Tidak semua konstanta kesetimbangan *independent*, pada kasus ini konstanta kesetimbangan yang *independent* hanyalah Kw, K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, dan K<sub>4</sub>. Adapun konstanta kesetimbangan K<sub>3</sub> dapat diperoleh dengan persamaan:

$$K_3 = K_1 \times K_4 \quad (2.49)$$

Langkah – langkah reaksi yang menentukan laju reaksi untuk reaksi (2.37) adalah :



Pada larutan yang memiliki pH > 8, reaksi (2.50) dapat diabaikan, dan reaksi (2.51) yang lebih dominan dan sebagai laju persamaan laju reaksinya adalah:

$$r_{\text{CO}_2-\text{OH}^-} = k_{\text{OH}^-} [\text{OH}^-] [\text{CO}_2] \quad (2.52)$$

$$\log_{10} k_{\text{OH}^-} = 13,635 - \frac{2895}{T \text{ (K)}} \quad (2.53)$$

Dapat diketahui dari penelitian yang telah dilakukan oleh Shen dkk, reaksi antara CO<sub>2</sub> dan *arginine* ditunjukkan pada persamaan (2.33) – (2.34). Maka, dapat diketahui persamaan laju reaksinya dapat dilihat pada persamaan (2.35).

Terdapat dua kondisi asimtotik utama,  $\frac{k_{-2 \text{ arg}}}{\sum_i k_{Bi} [Bi]} \ll 1$  dan  $\frac{k_{-2 \text{ arg}}}{\sum_i k_{Bi} [Bi]} \gg 1$ , kondisi ini dapat digunakan untuk menyederhanakan model reaksi kinetik dari garam asam amino. Adapun pada penelitian ini diberikan kondisi batas (*limiting condition*), dimana  $\frac{k_{-2 \text{ arg}}}{\sum_i k_{Bi} [Bi]} \ll 1$  (laju deprotonisasi zwitterion lebih cepat dibandingkan dengan laju balik (*reverse rate*) dari CO<sub>2</sub> dan *arginine*). Maka, berdasarkan kondisi dimana  $\frac{k_{-2 \text{ arg}}}{\sum_i k_{Bi} [Bi]} \ll 1$  laju reaksi dapat didefinisikan sebagai persamaan (2.36).

Dapat diketahui dari penelitian sebelumnya (Pawlak dkk, 2011) bahwa nilai  $k_{\text{MDEA}}$  sebesar:



$$k_{\text{MDEA}} = 2,07 \times 10^9 \exp\left(\frac{-5912,7}{T}\right) \quad (2.55)$$

Persamaan laju reaksi *overall* ( $r_{\text{ov}}$ ) dapat didefinisikan sebagai berikut (Shen dkk, 2013) :

$$r_{\text{ov}} = k_{\text{ov}} [\text{CO}_2] \quad (2.56)$$

dimana  $k_{\text{ov}}$  adalah konstanta laju reaksi *overall pseudo first order*

$$k_{\text{ov}} = k_{\text{OH}^-} [\text{OH}^-] + k_{\text{arg}} [\text{Arg}] + k_{\text{MDEA}} [\text{MDEA}] \quad (2.57)$$

Maka, dapat didefinisikan pula bahwa :

$$k_{app} = k_{ov} - k_{OH^-} [OH^-] - k_{MDEA} [MDEA] \quad (2.58)$$

dimana,

$$k_{app \text{ arginine}} = k_{arg} [Arg]^n \quad (2.59)$$

- Kondisi reaksi pada absorpsi CO<sub>2</sub> dalam larutan MDEA berpromotor *arginine* umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat *pseudo first order* dengan ketentuan nilai bilangan Hatta adalah  $3 < Ha < \frac{1}{2} Ei$ , dimana (Lin dan Shyu, 2009) :

$$Ha = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L} \quad (2.60)$$

Untuk  $Ha > 3$ , laju absorpsi CO<sub>2</sub> adalah (Danckwerts, 1970; Lin dan Shyu, 1999) :

$$\bar{R} = ([CO_2]_i - [CO_2]_e) \sqrt{D_{AL} k_{ov}} \quad (2.61)$$

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{[R_3N]}{z [CO_2]_i} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \quad (2.62)$$

## II.4 Absorpsi CO<sub>2</sub> dalam WWC

WWC merupakan kolom yang terdiri dari tabung silinder tegak dimana cairan dimasukkan dari bagian atas dan mengalir sepanjang dinding tabung berupa lapisan tipis (*film*) kemudian keluar pada bagian bawah tabung, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.17. Udara dialirkan dari bagian bawah dan keluar dari bagian atas silinder. Ketika *film* telah mencapai kecepatan akhir distribusinya kecepatan  $v$  pada ketinggian  $x$  di bawah permukaan adalah (Altway, 2008).



$$U(x) = \frac{3}{2} \left( \frac{v}{\pi d} \right)^{2/3} \left( \frac{g\rho}{3\mu} \right)^{1/3} \left( 1 - x^2 \left[ \frac{\pi g d \rho}{3\mu v} \right]^{2/3} \right) \quad (2.63)$$

Dimana:  $U$  = kecepatan film cairan,  $v$  = laju alir volumetrik cairan,  $d$  = diameter pipa yang dialiri cairan,  $g$  = percepatan gravitasi,  $\rho$  = densitas cairan,  $\mu$  = viskositas cairan

Kecepatan  $U$  adalah 0 pada permukaan dinding pipa, dimana  $x = \delta$  ( $\delta$  = tebal *film*), maka:

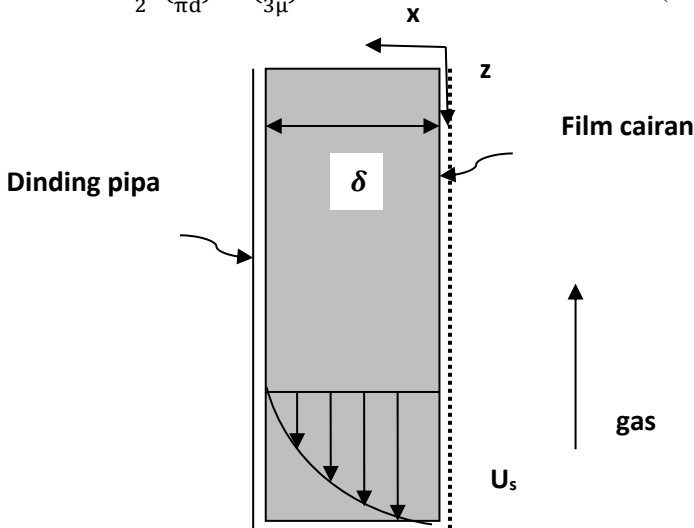
$$\delta = \left[ \frac{3\mu v}{\pi g d \rho} \right]^{1/3} \quad (2.64)$$

Sehingga persamaan (2.64) dapat ditulis:

$$U = U_s (1 - x^2 / \delta^2) \quad (2.65)$$

Kecepatan  $U_s$  pada permukaan ( $x = 0$ ) adalah

$$U_s = \frac{3}{2} \left( \frac{v}{\pi d} \right)^{2/3} \left( \frac{g\rho}{3\mu} \right)^{1/3} \quad (2.66)$$



**Gambar II. 4** Distribusi kecepatan *Wetted Wall Colum* (WWC)

Dan jika tinggi kolom adalah  $h$  dan reaksi dianggap di daerah dekat permukaan, maka waktu kontak gas terhadap permukaan *film* adalah:

$$t = \frac{h}{U_s} = \frac{2h}{3} \left[ \frac{3\mu}{g\rho} \right]^{1/3} \left[ \frac{\pi d}{v} \right]^{2/3} \quad (2.67)$$

Bila  $Q_{(t)}$  adalah jumlah gas yang terserap per satuan luas permukaan selama waktu kontak ( $t$ ), maka laju absorpsi rata-rata selama waktu  $t$  adalah  $Q_{(t)}/(t)$ . *Film* dianggap sangat tipis, maka area total permukaan yang terbuka sama dengan permukaan pipa sebesar  $\pi dh$ , laju total absorpsi ( $q$ ) ke dalam *film* menjadi:

$$\frac{Q_{(t)}}{t} = \frac{q}{\pi dh} \quad (2.68)$$

Laju absorpsi ( $q$ ) dapat dihitung secara eksperimen, dan  $Q(t)$  dihitung dari persamaan (2.40),  $t$  dihitung dari persamaan (2.39) dan dapat diubah – ubah dengan merubah laju alir ( $v$ ) atau tinggi kolom ( $h$ ). Jadi  $Q(t)$  dapat ditentukan sebagai fungsi waktu ( $t$ ) (Altway, 2008).

### Penelitian Terdahulu Absorpsi Reaktif

Beberapa penelitian terdahulu yang dapat dijadikan sebagai acuan untuk referensi, seperti yang telah tercantum dalam Tabel 2.13 berikut:

**Tabel II. 6** Penelitian Terdahulu Absorpsi Reaktif

No	Tahun	Nama Peneliti	Uraian
1	1983	Blauwhoff dan Versteeg	Mempelajari reaksi antara CO <sub>2</sub> dan alkanolamine dalam aqueous solution yang mendapati bahwa DEA dan DIPA sangat cocok diterapkan dengan penurunan rumus kecepatan reaksi dari

No	Tahun	Nama Peneliti	Uraian
			<i>the proposed mechanism</i>
2	1987	Yih dan Sun	Mempelajari absorpsi hidrogen sulfida dan CO <sub>2</sub> dalam larutan kalium karbonat dengan atau tanpa promotor amine (DEA dan DIPA) pada temperatur 22-800C menggunakan peralatan WWC.
3	2000	Bishnoi dan Rochelle	Mempelajari simulasi absorpsi CO <sub>2</sub> dalam larutan <i>piperazine</i> /MDEA disertai reaksi kimia dengan reaksi kimia dengan menggunakan model difusivitas eddy
4	2004	Cullinane dan Rochelle	Melakukan penambahan 0,6 M promotor <i>piperazine</i> dalam 20-30 %berat larutan kalium karbonat pada temperatur 40-80 <sup>0</sup> C menggunakan peralatan WWC. <i>Piperazine</i> merupakan promotor yang efektif dikarenakan dengan penambahan 0,6 M <i>piperazine</i> dalam 20% berat larutan kalium karbonat meningkatkan laju absorpsi pada temperatur 60 <sup>0</sup> C.
5	2014	Rif'ah	Mempelajari kinetika penyerapan CO <sub>2</sub> dalam larutan K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> berpromotor campuran DEA dan MDEA.

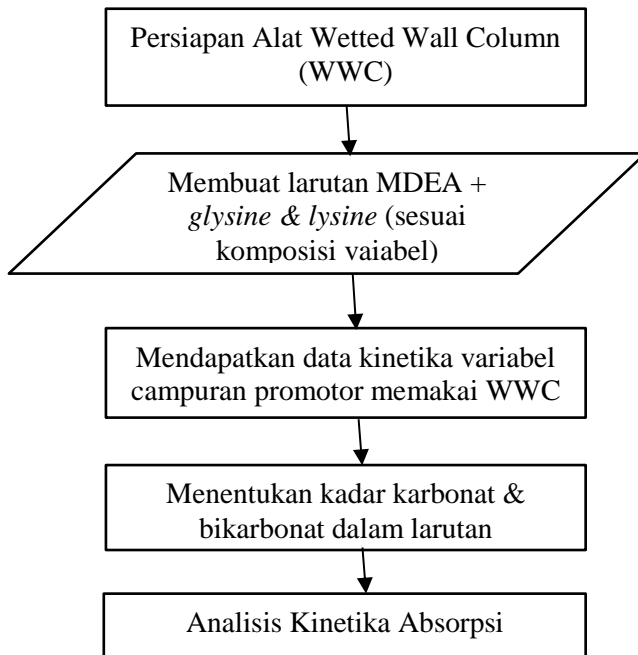
No	Tahun	Nama Peneliti	Uraian
6	2014	Damara dan Permatasari	Mempelajari kinetika penyerapan CO <sub>2</sub> menggunakan larutan K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> berpromotor <i>amine</i> .
7	2015	Hestia dan Arsi	Mempelajari kinetika penyerapan CO <sub>2</sub> menggunakan larutan DEA berpromotor <i>glycine</i> .

***(Halaman ini sengaja dikosongkan)***

### BAB III

## METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini larutan Methyldiethanolamin (MDEA) berpromotor campuran asam amino: *glysine* dan *arginine* dipakai pada *Wetted Wall Column* (WWC) dan skala laboratorium untuk mengevaluasi kinerja dari larutan tersebut dalam menyerap gas CO<sub>2</sub>.



**Gambar III. 1** Flowchat Penelitian

### III.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian akan dilaksanakan selama 5 bulan yang dimulai tanggal 1 Februari 2017 hingga tanggal 30 Juni 2017. Tempat pelaksanaan penelitian adalah di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Surabaya.

### III.2 Rancangan Percobaan

#### III.2.1 Penetapan Variabel

- Variabel Tetap
  1. Tekanan : 1 atmosfer
  2. Gas Umpan : campuran 40% CO<sub>2</sub> + 60% N<sub>2</sub>
  3. Laju alir gas umpan : 6 L/menit
  4. Pelarut : Larutan MDEA 40% berat total pelarut
  5. Laju alir pelarut : 200 mL/menit
  6. Jenis promotor : *Arginine* dan *Glycine*
- Variabel Bebas

Variabel bebas pada penelitian ini adalah suhu operasi, kombinasi dan konsentrasi promotor. Variabel bebas yang dimaksud dapat dilihat pada tabel di bawah ini: Variabel suhu yang digunakan: 30, 40, 50 °C

**Tabel III. 1** Variabel Bebas Percobaan

<b>No.</b>	<b>Persentase Berat Promotor</b>	<b>Perbandingan</b>		<b>Persentase Berat Solvent</b>
		<i>Arginine</i>	<i>Glycine</i>	
<b>1</b>	1%	1	1	+ Aquadest 59%
<b>2</b>	1%	1	2	+ Aquadest 59%
<b>3</b>	1%	2	1	+ Aquadest 59%
<b>4</b>	1%	0	1	+ Aquadest 59%
<b>5</b>	1%	1	0	+ Aquadest 59%
<b>6</b>	5%	1	1	+ Aquadest 55%
<b>7</b>	5%	1	2	+ Aquadest 55%
<b>8</b>	5%	2	1	+ Aquadest 55%
<b>9</b>	5%	0	1	+ Aquadest 55%
<b>10</b>	5%	1	0	+ Aquadest 55%

**Tabel III. 2** Massa Absorben dan Promotor yang Digunakan pada Penelitian

<b>No.</b>	<b>Massa yang digunakan (kg)</b>			
	MDEA	Arginine	Glycine	Aquadest
<b>1</b>	2.5	0.0390	0.04821	3.54
<b>2</b>	2.5	0.0260	0.06428	3.54
<b>3</b>	2.5	0.0520	0.03214	3.54



<b>4</b>	2.5	0	0.09642	3.54
<b>5</b>	2.5	0.0780	0	3.54
<b>6</b>	2.5	0.1950	0.24105	3.3
<b>7</b>	2.5	0.1300	0.3214	3.3
<b>8</b>	2.5	0.2600	0.1607	3.3
<b>9</b>	2.5	0	0.4821	3.3
<b>10</b>	2.5	0.3900	0	3.3
	<b>25</b>	<b>1.1700</b>	<b>1.4463</b>	<b>34.2</b>

### III.2.2 Analisis Sampel

Analisa konsentrasi awal dan akhir kandungan karbonat dan bikarbonat dilakukan dengan metode titrasi menggunakan larutan HCl yang telah distandardisasi dan indikator *phenolphthalein* dan *metil orange*.

### III.3 Bahan dan Alat yang Digunakan

#### 1.3.1 Bahan yang Digunakan

1. Campuran Gas CO<sub>2</sub> 40% *balance* N<sub>2</sub>
2. MDEA
3. *Glycine*
4. *Arginine*
5. Indikator *Phenolphthalein* dan *Metil Orange*
6. KOH
7. HCl
8. NaOH
9. BaCl<sub>2</sub>
10. Aquadest
11. Sodium Borat
12. Asam Oksalat

#### 1.3.2 Alat yang Digunakan

1. Rangkaian *Wetted Wall Column* (WWC)
2. *Beaker Glass* & Erlenmeyer
3. Burret & Statif
4. Spatula

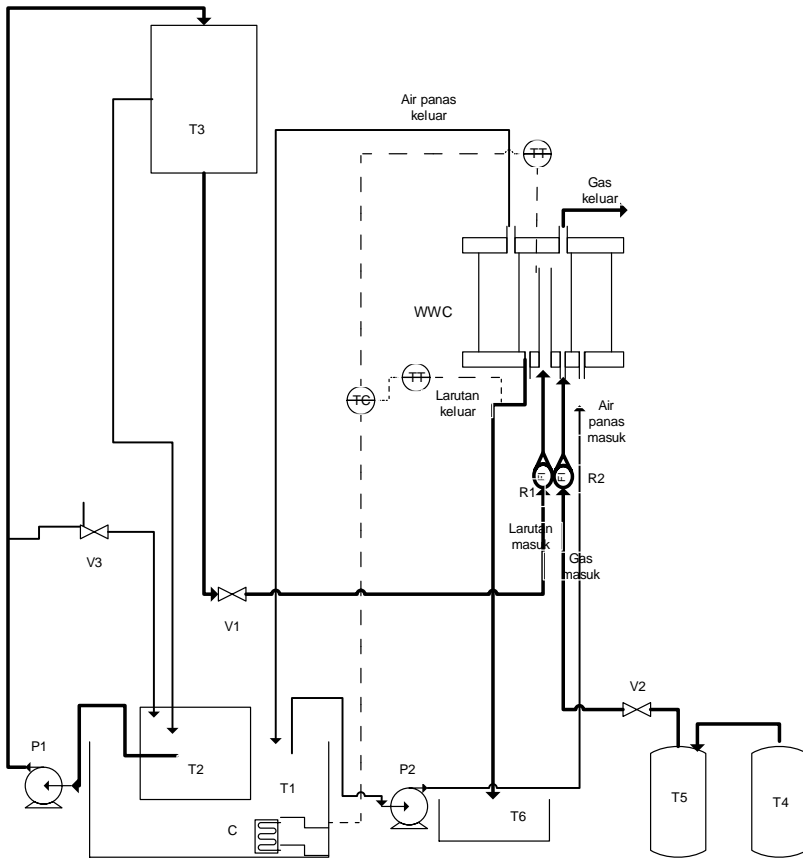
5. Pipet Tetes & Pipet Volum
6. Corong Kaca
7. pH meter
8. Kertas Saring Whatman
9. Gelas ukur
10. Labu ukur
11. Heater
12. Botol Sampel
13. *Stopwatch*

### III.4 Langkah Percobaan

Prosedur Percobaan yang akan dilakukan berdasarkan percobaan yang telah dilakukan oleh Altway A., dkk. 2008.

#### III.4.1 Tahap Persiapan Bahan dan Peralatan Penelitian

- a. Mempersiapkan bahan penelitian, seperti campuran gas CO<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub>, MDEA, *glysine*, *Arginine*, aquades, indicator *Phenolphthalein* (PP) dan *Methylorange* (MO), KOH, NaOH, HCl, Boraks dan Asam Oksalat
- b. Menstandisasi larutan NaOH 0.05 M menggunakan larutan 10 mL asam oksalat dan indicator 2 tetes PP, serta menstandisasi larutan HCl 0.1 M menggunakan 10 ml larutan boraks dan 2 tetes indikator MO
- c. Melarutkan promotor (*Arginine dan glycine*) dengan activator KOH dalam MDEA dan Aquades sesuai dengan variabel
- d. Mempersiapkan peralatan penelitian, seperti bak penampung larutan MDEA, penampung sampel (ampul), buret, statif, erlenmeyer, *heater*, pH meter dan *stopwatch*
- e. Merangkai peralatan WWC.
- f. Mempersiapkan peralatan analisa berupa buret, Erlenmeyer, heater, kertas saring dan corong kaca yang digunakan untuk analisa larutan.
- g. Alat dan bahan siap digunakan



**Gambar III. 2** Rangkaian Alat WWC

Keterangan gambar :

- C : Koil pemanas
- P1 : Pompa larutan MDEA berpromotor
- P2 : Pompa air
- R1 : Rotameter cairan
- R2 : Rotameter gas
- T1 : *Waterbath*

T2	: Tangki reservoir (tangki penampung larutan MDEA berpromotor)
T3	: Tangki <i>overflow</i>
T4	: Tangki gas umpan (CO <sub>2</sub> )
T5	: Tabung saturator
T6	: Tangki sampel
TT	: <i>Thermo transmitter</i>
TC	: <i>Thermo control</i>
V1	: <i>Gate valve</i> larutan
V2	: <i>Gate valve</i> CO <sub>2</sub>
V3	: <i>Gate valve (by pass)</i>
WWC	: <i>Wetted wall column</i>

#### III.4.2 Tahap Pelaksanaan Penelitian Absorpsi CO<sub>2</sub>

- a. Mengisi air ke dalam *waterbath* (T1) sebagai pengatur temperatur dalam jaket WWC.
- b. Memasukkan larutan MDEA berpromotor ke dalam tangki *reservoir* (T2).
- c. Mengatur temperatur sesuai dengan variabel.
- d. Mensirkulasikan air panas pada sisi anulus kolom WWC dan kembali ke *waterbath* (T1).
- e. Mensirkulasikan larutan MDEA berpromotor menggunakan pompa dari tangki *reservoir* (T2) ke tangki *overflow* (T3) hingga larutan *overflow*.
- f. Mengatur laju alir larutan MDEA berpromotor, sehingga larutan mengalir dari bawah ke atas melalui bagian dalam *tube* hingga terbentuk lapisan tipis pada permukaan *tube*.
- g. Pada saat temperatur sistem telah mencapai yang diinginkan dan aliran telah stabil, campuran gas CO<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub> dialirkan melewati tangki saturator (T5).

- h. Kemudian campuran gas  $\text{CO}_2$  dan  $\text{N}_2$  mengalir dari bawah kolom menuju atas kolom bagian luar pipa *stainless steel* sehingga terjadi kontak antara gas  $\text{CO}_2$  dan  $\text{N}_2$  dengan lapisan tipis cairan di seluruh permukaan luar *tube* hingga kondisi *steady state*.
- i. Apabila tercapai kondisi *steady state*, mengambil sampel larutan MDEA berpromotor pada tangki penampung sampel (T6) untuk dilakukan analisa kandungan karbonat dan bikarbonat.

### III.4.3 Analisa Sampel

- a. Menyiapkan 5 ml sampel MDEA akhir yang telah kontak dengan  $\text{CO}_2$  di erlenmeyer.
- b. Tambahkan 50 ml  $\text{NaOH}$  0,05 M ke dalam sampel dan diaduk hingga homogen.
- c. Tambahkan larutan 25 ml  $\text{BaCl}_2$  ke dalam sampel dengan pemanasan di heater hingga suhu maksimum  $50^\circ\text{C}$ .
- d. Diamkan hingga terbentuk endapan dan mengendap di dasar erlenmeyer.
- e. Lakukan pemisahan endapan dengan kertas saring Whatman dan corong kaca.
- f. Cuci endapan yang tersaring dengan aquadest untuk melarutkan sisa  $\text{NaOH}$ . Pastikan sudah tercuci dengan sempurna.
- g. Larutkan endapan dengan 20 ml larutan  $\text{HCl}$  0,1 M
- h. Panaskan larutan dengan heater selama 2 menit dengan suhu maksimum  $50^\circ\text{C}$ .
- i. Tambahkan aquadest hingga volume larutan menjadi 75 ml.
- j. Tambahkan 2 tetes indikator methyl orange (MO) ke dalam sampel sehingga berubah warna menjadi merah.

- k. Lakukan titrasi sampel dengan NaOH 0,05 M hingga pH mendekati 7 ( warna sampel menjadi kuning).
- l. Catat volume NaOH 0,05 M yang digunakan.

#### III.4.3 Evaluasi Data

Berdasarkan data hasil eksperimen dan beberapa literatur dapat dilakukan perhitungan untuk menentukan konstanta laju reaksi berpromotor dengan tahapan sebagai berikut:

- Perhitungan waktu kontak gas-cairan (Danckwerts, 1970):

$$t_c = \frac{h}{U_s} = \frac{2h}{3} \left[ \frac{3\mu}{g\rho} \right]^{1/3} \left[ \frac{\pi d}{v} \right]^{2/3} \quad (3.1)$$

- Perhitungan mol bikarbonat (Karl Anders Hoff, 2003):

$$C_{CO_2} = \frac{(V_{HCl} - V_t - \Delta V_b) \times C_{NaOH}}{2 \times V_s}$$

$V_{HCl}$  merupakan volume total HCl 0.1 M yang ditambahkan dalam pelarutan endapan.  $V_t$  adalah volume NaOH 0.05 M yang didapat dari hasil titrasi. Sedangkan  $V_b$  adalah selisih volume larutan NaOH 0.05 M dengan HCl 0.1 M yang ditambahkan pada larutan control sampel sebelum kontak dengan  $CO_2$  (Karl Anders Hoff, 2003).

- Perhitungan jumlah gas yang diserap per satuan luas permukaan selama waktu kontak (t), maka laju rata-rata absorpsi selama t adalah  $Q(t)/t$  adalah (Danckwerts, 1970) :
- $$\frac{Q(t)}{t} = \frac{q}{\pi d h} \text{ dimana:}$$

$$q = v \times \{ ([CO_3^{2-}]_{out} - [CO_3^{2-}]_{in}) + ([HCO_3^-]_{out} - [HCO_3^-]_{in}) \} \quad (3.3)$$

- Perhitungan  $[OH^-]$  dan  $[CO_2]_e$  dari reaksi kesetimbangan menggunakan persamaan (Yi dkk, 2009):

$$[OH^-] = \frac{K_W}{K_2} \frac{[CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} \quad (3.4)$$

$$[CO_2]_e = \frac{K_2 K_4}{K_3} \frac{[HCO_3^-]^2}{[CO_3^{2-}]} \quad (3.5)$$

- Nilai  $K_w$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ , dan  $K_4$  didapat dari persamaan berikut:

$$K_W = \exp\left(140.392 - \frac{13445.9}{T} - 22.4773 \ln T\right) \quad (3.6)$$

(Guo-Wen Xu dkk., 1998; Edwards, 1976)

$$K_1 = \exp\left(235.482 - \frac{12092.10}{T} - 22.4773 \ln T\right) \quad (3.7)$$

(Yi dkk, 2009; Danckwerts dan Sharma, 1966)

$$K_2 = \exp\left(-294,74 + \frac{3,6439 \times 10^5}{T} - \frac{1,8416 \times 10^8}{T^2} + \frac{4,1579 \times 10^{10}}{T^3} - \frac{3,5429 \times 10^{12}}{T^4}\right) \quad (3.8)$$

(Guo-Wen Xu dkk., 1998; Edwards, 1976)

$$K_4 = \left(\frac{1}{10^{(-14.01+0.0184 T)}}\right) \quad (3.9)$$

(Guo-Wen Xu dkk., 1998; Edwards, 1976)

Tidak semua konstanta kesetimbangan *independent*, pada kasus ini konstanta kesetimbangan yang *independent*

hanya K<sub>w</sub>, K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, dan K<sub>4</sub>. Adapun konstanta kesetimbangan K<sub>3</sub> dapat diperoleh dengan persamaan:

$$K_3 = K_1 \times K_4 \quad (3.10)$$

- Perhitungan nilai  $[CO_2]_i$  didapatkan dengan cara trial  $k_{ov}$ , menggunakan persamaan (Altway, 2008) :

$$[CO_2]_i = \frac{k_g P_A + [CO_2]_e \sqrt{D_{AL} k_{ov}}}{k_g H_e + \sqrt{D_{AL} k_{ov}}} \quad (3.11)$$

- Nilai koefisien difusitas dalam gas diperoleh dari persamaan Wilke Chan (Wilke dan Chang, 1955):

$$D_{AL/BL} = 1,173 \times 10^{-16} \sqrt{(\varphi M_B)} \frac{T}{\mu_B V_A^{0,6}} \quad (3.12)$$

- Nilai koefisien difusivitas dalam liquid diperoleh dari persamaan Wilke Chang (Wilke dan Chang, 1955):

$$D_{AL/BL} = 1,173 \times 10^{-16} \sqrt{(\varphi M_B)} \frac{T}{\mu_B V_A^{0,6}} \quad (3.13)$$

- Nilai koefisien perpindahan massa sisi gas ( $k_g$ ) diperoleh dari persamaan (Cullinane dan Rochelle, 2004)

$$k_g = \frac{Sh D_{AG}}{R T d} \quad (3.14)$$

dimana,

$$Sc = \frac{\mu_g}{\rho_g D_{AG}} \quad (3.15)$$

$$V = \frac{4 \times Q_G}{\pi \times d^2} \quad (3.16)$$



$$Re = \frac{\rho_g v d}{\mu_g} \quad (3.17)$$

$$Sh = 1.075 (Re Sc \frac{d}{h})^{0.85} \quad (3.18)$$

(Geankoplis, 1993)

- Data kelarutan di dapat dari persamaan konstanta Henry:

$$\log\left(\frac{He}{He^0}\right) = h_1 I_1 + h_2 I_2 \quad (3.19)$$

$$H_e^0 = 2,82 \times 10^6 \exp\left(\frac{-2044}{T}\right) \quad (3.20)$$

(Yi dkk, 2009; Weinsenberger dan Schumpe, 1996)

$$h_G = h_{G,o} + h_T * (T - 298,15) \quad (3.21)$$

(Weinsenberger dan Schumpe, 1996)

- Menentukan aliran fluida melalui pipa :

$$\delta = \left[ \frac{3\pi \theta}{\rho g \pi D} \right]^{1/3} \quad (3.21)$$

$$Vmax = \frac{\rho g \delta^2}{2\pi} \quad (3.22)$$

- Nilai koefisien perpindahan massa sisi cairan ( $k_L$ ) diperoleh dari persamaan (Hatta dan Katori, 1934)

$$k_L = \sqrt{\frac{4 \times D_{AB} \times Vmax}{\pi h}} \quad (3.23)$$

- Setelah didapatkan nilai  $[CO_2]_i$  dari persamaan (3.11), maka nilai  $k_{ov}$  dapat ditentukan dari persamaan (Danckwerts, 1970):

$$\varphi = \left( \frac{\frac{Q}{t} \times k_g \times H_e}{k_g P_A - C_{Ae} k_g - \frac{Q}{t}} \right) \quad (3.24)$$

$$\varphi = \sqrt{D_{AL} \times k_{ov}} \quad (3.25)$$

- Menentukan nilai  $k_{app}$  dari persamaan dibawah ini:

$$k_{app} = k_{ov} - k_{OH^-} [OH^-] - k_{MDEA} [MDEA] \quad (3.26)$$

Dimana:

$$k_{app} = k_{Arginine} [Arginine] + k_{Glycine} [Glycine] \quad (3.27)$$

- Harga  $k_{OH^-}$  dan  $k_{MDEA}$  diperoleh dari persamaan berikut :

$$\log_{10} k_{OH^-} = 13,635 - \frac{2895}{T} \quad (3.28)$$

(Lin dan Shyu, 1999)

$$k_{MDEA} = 2,07 \times 10^9 \exp \left( \frac{-5912,7}{T} \right) \quad (3.29)$$

(Pawlak dkk, 2011)

- Konstanta laju reaksi *promotor* ( $k_{promotor}$ ) merupakan fungsi temperatur yang dinyatakan dengan persamaan Arhenius :

$$k_{promotor} = A_{promotor} e^{\frac{-E}{RT}} \quad (3.30)$$

$$\ln k_{promotor} = \ln A - \frac{E}{RT} \quad (3.31)$$

**Keterangan:**

- Kondisi reaksi pada absorpsi CO<sub>2</sub> dalam larutan MDEA berpromotor umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat *pseudo first order* dengan ketentuan nilai  $3 < Ha < \frac{1}{2} Ei$ , dimana

$$Ha = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{K_L} \quad (3.32)$$

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{[R_3N]}{z [CO_2]_i} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \quad (3.33)$$

(Danckwerts, 1970; Lin dan Shyu, 1999)

## **BAB IV**

### **HASIL PEMBAHASAN**

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan data kinetika reaksi absorpsi CO<sub>2</sub> dalam larutan *Methyldiethanolamine* (MDEA) berpromotor campuran asam amino *Arginine* (Arg) dan *glycine* (Gly) dengan menggunakan *Wetted Wall Column* (WWC) dan menentukan komposisi campuran glycine dan lysine serta suhu operasi terbaik untuk kinetika absorpsi MDEA berpromotor glycine dan lysine. Penelitian ini dilakukan pada kondisi operasi tekanan atmosferik dengan variabel suhu yakni, 303,15 – 323,15 K. Campuran gas yang digunakan adalah 40% CO<sub>2</sub> dan 60% N<sub>2</sub>. Sistem larutan terdiri dari larutan 40% berat MDEA dengan variasi penambahan promotor 1% dan 5% berat. Promotor terdiri dari *Arginine* dan *glycine* dimana pada setiap variasi promotor memiliki variasi *Arginine* dan *glycine* dengan komposisi 1:1, 1:2, 2:1, 0:1, dan 1:0. Laju alir larutan dipertahankan pada 200 mL/menit agar aliran tetap dalam kondisi laminar dan menjaga agar kondisi tetap pada *pseudo first order*.

#### **IV.1 Sifat Fisik *Methyldiethanolamine* (MDEA) Berpromotor Asam Amino**

##### **IV.1.1 Massa Jenis**

Pada penelitian ini, massa jenis dari tiap larutan absorben MDEA 40% berpromotor *Arginine* dan *Glycine* diukur menggunakan picnometer 10 mL untuk mempelajari perubahan massa jenis pada setiap suhu dan variabel yang diteliti. Perhitungan massa jenis dilakukan pada setiap sampel variabel sebelum dan sesudah dikontakkan gas masing-masing pada suhu 303.15 – 323.15 K.

Pada Tabel 4.1 berikut disajikan massa jenis pada variabel penelitian ini:

**Tabel IV. 1** Massa Jenis Larutan

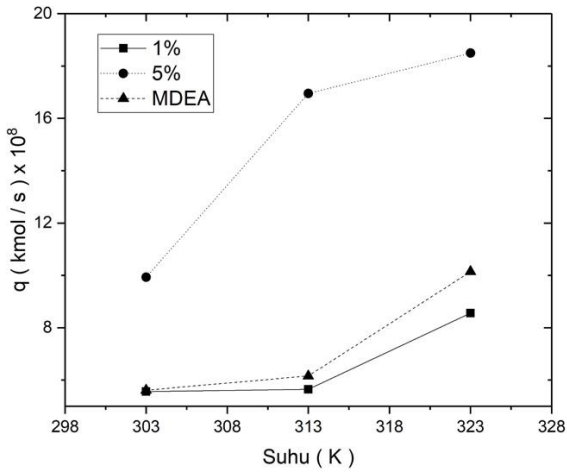
Suhu (Kelvin)	1%berat (Arginine:Glycine) $\rho$ ( kg / m <sup>3</sup> )				
	1:1	1:2	2:1	1:0	0:1
<b>303</b>	1035.79	1038.06	1034.76	1034.3	1038.67
<b>313</b>	1035.06	1037.83	1034.37	1033.7	1038.21
<b>323</b>	1033.59	1037.43	1034.33	1032.91	1037.34
Suhu (Kelvin)	5% berat (Arginine:Glycine) $\rho$ (kg / m <sup>3</sup> )				
	1:1	1:2	2:1	1:0	0:1
<b>303</b>	1063.88	1068.32	1062.42	1058.11	1073.17
<b>313</b>	1063.8	1067.92	1061.21	1058.07	1072.47
<b>323</b>	1061.39	1066.33	1059.95	1057.75	1071.18

Dapat diamati pada **tabel IV.1** bahwa massa jenis absorben akan menurun seiring dengan naiknya suhu dan terserapnya CO<sub>2</sub> pada larutan. Sifat fisik ini juga sesuai dengan apa yang telah dilakukan oleh Shen dkk., 2013 dan van Holst dkk., 2008. Hal ini tentunya akan sangat tidak menguntungkan untuk penyerapan CO<sub>2</sub> dengan meningkatnya suhu, *loading* CO<sub>2</sub> larutan dan penambahan arginin dari sudut pandang termodinamika (Shen dkk., 2013).

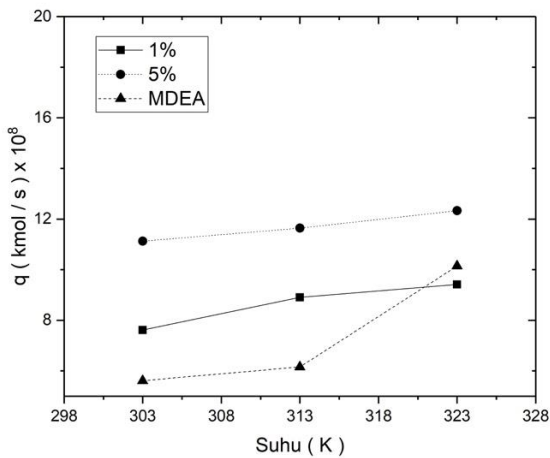
#### **IV.2 Pengaruh Penambahan Campuran Promotor Asam Amino pada MDEA Terhadap Laju absorpsi CO<sub>2</sub>**

Untuk menentukan kinetika reaksi pada penelitian ini, perlu diketahui terlebih dahulu laju penyerapan CO<sub>2</sub> oleh absorben. CO<sub>2</sub> terserap ini didapat setelah absorben dialirkan pada alat *Wetted Wall Column* (WWC) dan dikontakkan dengan campuran gas CO<sub>2</sub> 40% dan NO<sub>2</sub> 60% pada waktu tertentu. Larutan yang kaya dengan CO<sub>2</sub> kemudian dianalisa kandungan CO<sub>2</sub> nya menggunakan metode pengendapan dengan BaCl<sub>2</sub> dan dilarutkan kembali dengan HCl untuk kemudian di titrasi dengan NaOH untuk mengetahui sisa HCl yang tidak bereaksi (Hoff,

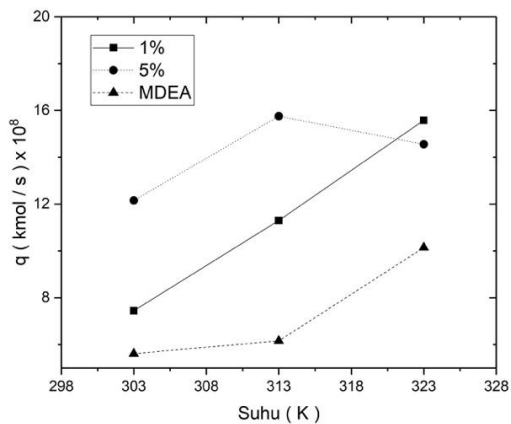
2003). Berikut hasil data penelitian laju absorpsi  $\text{CO}_2$  pada variabel masing-masing penambahan promotor:



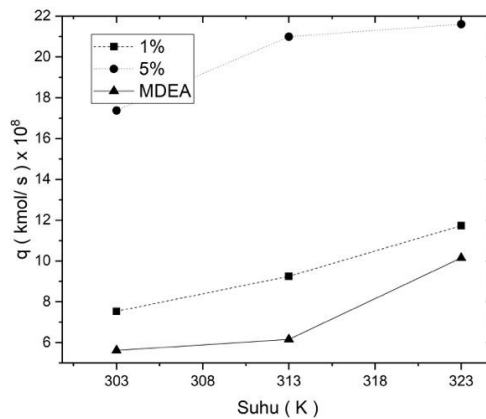
**Gambar IV. 1** Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absorpsi  $\text{CO}_2$  dengan variabel % berat promotor dengan komposisi 1:1



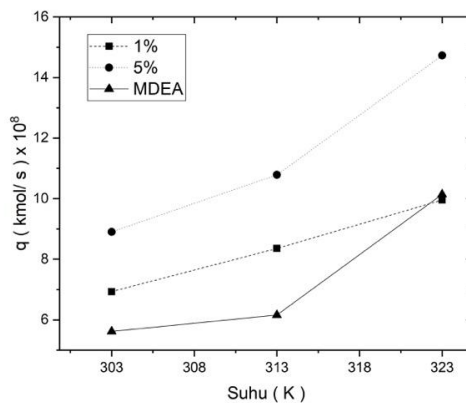
**Gambar IV. 2** Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju abspsi  $\text{CO}_2$  dengan variabel % berat promotor dengan komposisi 1:2



**Gambar IV. 3** Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju abspsi  $\text{CO}_2$  dengan variabel % berat promotor dengan komposisi 2:1



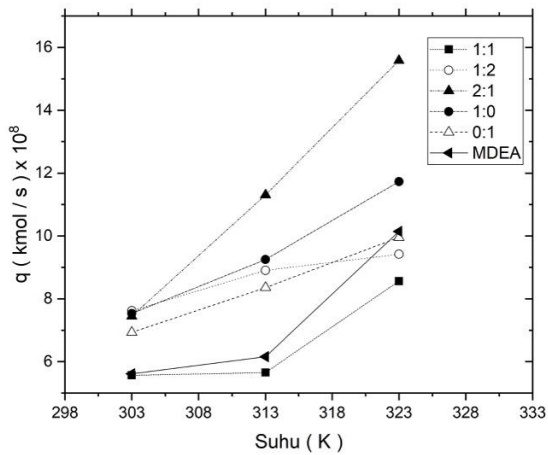
**Gambar IV. 4** Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju abspsi CO<sub>2</sub> dengan variabel % berat promotor dengan komposisi 1:0



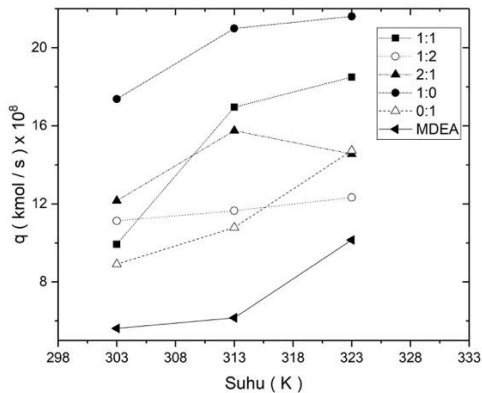
**Gambar IV. 5** Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju abspsi CO<sub>2</sub> dengan variabel % berat promotor dengan komposisi 0:1



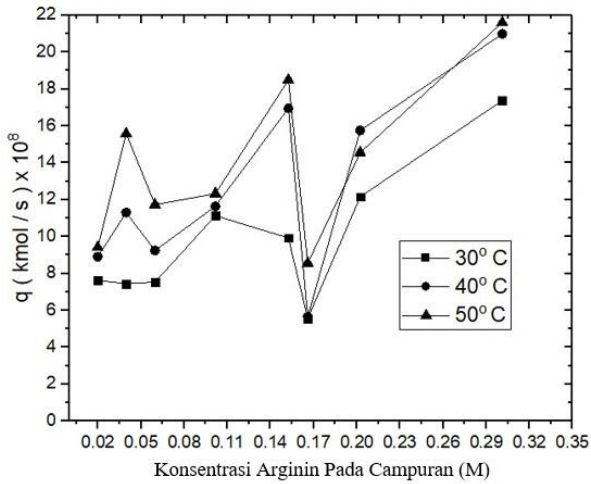
Penelitian ini memiliki dua variabel penambahan berat promotor yakni 1% dan 5%. Pada penelitian ini dilakukan penyerapan yang disertai dengan reaksi kimia sesuai dengan persamaan (2.33) dan (2.37) dengan menjaga kondisi tetap pada *pseudo-first-order*. Dimana masing-masing variabel memiliki variasi komposisi yakni 1:1, 1:2, 2:1, 0:1, dan 1:0. **Gambar IV.1** – **Gambar IV. 5** menunjukkan pada suhu 313.15 bahwa laju absorpsi CO<sub>2</sub> MDEA murni tanpa promotor adalah sebesar  $6.15 \times 10^{-8}$  kmol/det. Pada penambahan 1% berat promotor 1:2 pada suhu dan kondisi yang sama adalah sebesar  $8.9 \times 10^{-8}$  kmol/det (45.2% kenaikan) dan pada penambahan 5% berat adalah sebesar  $11.64 \times 10^{-8}$  kmol/det (89.27% kenaikan). Sehingga, dapat disimpulkan bahwa pada komposisi campuran promotor yang sama, penambahan 5% berat promotor lebih tinggi dibandingkan dengan penambahan 1% berat promotor. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Gimeno dkk. (2013) bahwa terjadi peningkatan laju penyerapan CO<sub>2</sub> seiring dengan meningkatnya suhu. Begitu pula dengan penelitian Yih dkk. (1987) yang mengatakan bahwa walaupun peningkatan suhu akan menurunkan kelarutan CO<sub>2</sub> pada pelarut, hal ini juga akan menurunkan viskositas larutan dan meningkatkan laju reaksi kimia sehingga meningkatnya suhu akan berakibat pada peningkatan laju absorpsi CO<sub>2</sub>. Hal ini terjadi karena adanya pengaruh dari energi kinetik molekul-molekul zat yang bereaksi. Energi kinetik molekul-molekul zat akan bertambah ketika suhu dinaikkan, hal ini akan menyebabkan reaksi menjadi semakin cepat. Dikarenakan energi kinetik yang bertambah, maka gerakan molekul-molekul zat yang bereaksi menjadi semakin cepat. Peningkatan laju penyerapan CO<sub>2</sub> bervariasi pada berbagai komposisi campuran asam amino yang digunakan.



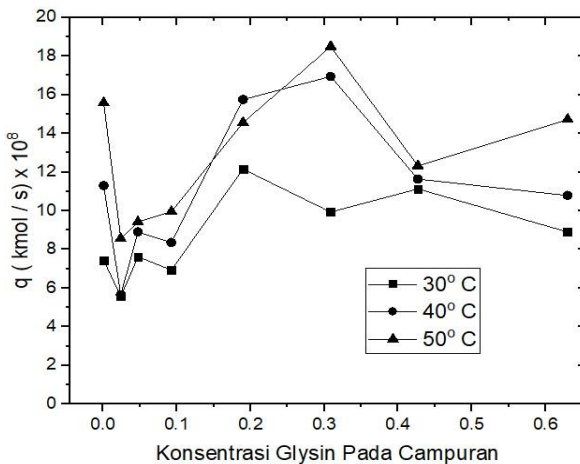
**Gambar IV. 6** Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absopsi CO<sub>2</sub> dengan variabel 1 % berat promotor



**Gambar IV. 7** Pengaruh kenaikan suhu terhadap laju absopsi CO<sub>2</sub> dengan variabel 5 % berat promotor

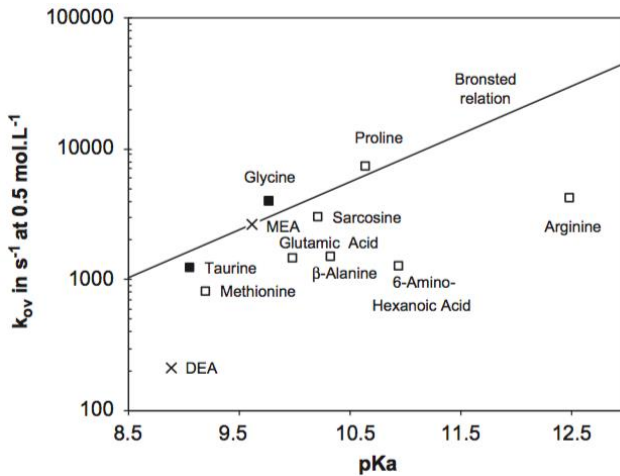


**Gambar IV. 8** Pengaruh konsentrasi arginin pada campuran terhadap laju absorpsi CO<sub>2</sub>



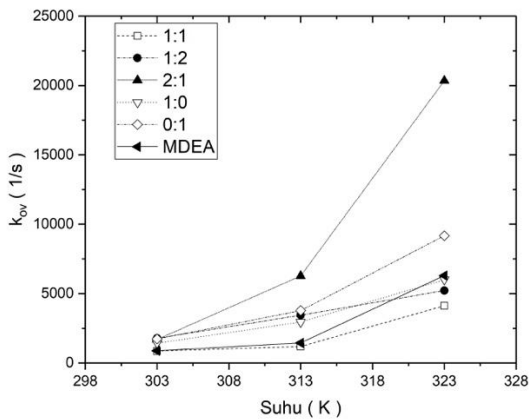
**Gambar IV. 9** Pengaruh konsentrasi glysin pada campuran terhadap laju absorpsi CO<sub>2</sub>

Dapat disimpulkan dan diamati pada **Gambar IV.6** dan **Gambar IV.7** bahwa laju penyerapan CO<sub>2</sub> akan semakin meningkat seiring dengan naiknya suhu operasi, selain itu tidak dapat disimpulkan campuran komposisi terbaik antara *arginin* dan *glycine* karena hasil dari laju absorpsi yang tidak konsisten sehingga antara dua variabel promotor tersebut tidak memiliki hasil yang sama. Namun, pada **Gambar IV.8** dan **Gambar IV.9** dapat diamat bahwa kondisi campuran terbaik untuk penyerapan CO<sub>2</sub> didapat pada Arginin 0.3011 M 50° C dan Glysin 0.2348 M 40° C. Pada variabel penambahan 1% berat promotor pada suhu 313.15 K, laju absorpsi yang paling besar adalah pada komposisi 2:1 sebesar  $11.3 \times 10^{-8}$  kmol/det, selanjutnya komposisi 1:0 sebesar  $9.25 \times 10^{-8}$  kmol/det, lalu komposisi 1:2 sebesar  $8.9 \times 10^{-8}$  kmol/det, selanjutnya komposisi 0:1 sebesar  $8.36 \times 10^{-8}$  kmol/det, dan terakhir komposisi 1:1 sebesar  $5.65 \times 10^{-8}$  kmol/det. Sedangkan untuk variabel penambahan 5% berat promotor yang paling besar adalah pada komposisi 1:0 sebesar  $20.99 \times 10^{-8}$  kmol/det, selanjutnya komposisi 1:1 sebesar  $16.95 \times 10^{-8}$  kmol/det, lalu komposisi 2:1 sebesar  $15.75 \times 10^{-8}$  kmol/det, selanjutnya komposisi 1:2 sebesar  $11.64 \times 10^{-8}$  kmol/det, dan yang paling rendah adalah komposisi 0:1 sebesar  $10.79 \times 10^{-8}$  kmol/det. Pada penelitian ini terdapat campuran antara dua promotor namun tidak dapat disimpulkan komposisi campuran yang paling reaktif karena adanya perbedaan hasil antara penambahan 1% dengan 5% tersebut. Hal ini diduga terjadi karena pengaruh interaksi antara *arginine* dan *glycine* yang perlu diteliti lebih lanjut. Secara umum, dibandingkan dengan MDEA 40% yang digunakan sebagai absorben tanpa campuran promotor, nilai kinetika reaksi total MDEA berpromotor campuran asam amino jauh lebih baik dan dapat meningkatkan penyerapan CO<sub>2</sub> hingga 209%. Nilai kinetika reaksi total yang diperoleh untuk MDEA berpromotor campuran asam amino maupun berpromotor tunggal sesuai studi yang telah dilakukan oleh Van Holst (2008) yang telah dipublikasikan pada **Gambar IV.10** di bawah ini:

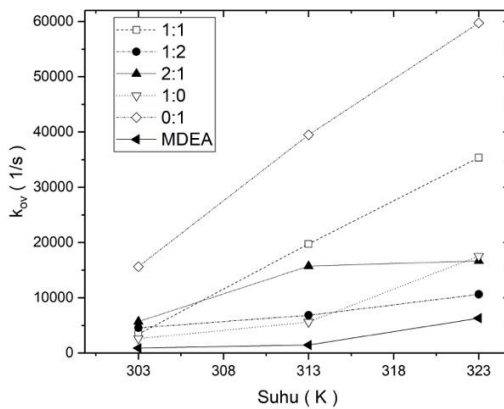


**Gambar IV. 10** Studi Hubungan  $k_{ov}$  dengan pKa beberapa macam asam amino oleh Van Holst, 2008

Performa kinetika reaksi total sangat penting untuk diketahui dalam penentuan desain absorber pada skala pabrik. Kinetika reaksi yang besar dapat meminimalisasi ukuran desain absorber yang tentunya akan menguntungkan karena dapat memangkas biaya pembuatan. Sedangkan pKa berpengaruh untuk meminimalisasi energi yang digunakan pada proses desorpsi. Semakin kecil pKa maka energi yang dibutuhkan untuk desorpsi akan semakin kecil. Dapat diamati bahwa performa kinetika reaksi total *glycine* dan *arginine* memang tidak signifikan, tetapi sangat signifikan pada perbedaan pKa yang tentunya berpengaruh pada proses desorpsi (Van Holst, 2008).



**Gambar IV. 11** Hubungan Konstanta Reaksi *Overall* ( $k_{ov}$ ) terhadap Suhu (K) pada MDEA + 1% Berat Promotor



**Gambar IV. 12** Hubungan Konstanta Reaksi *Overall* ( $k_{ov}$ ) terhadap Suhu (K) pada MDEA + 5% Berat Promotor

Seiring dengan meningkatnya laju penyerapan  $\text{CO}_2$ , hal ini akan diikuti dengan kenaikan konstanta reaksi *overall* ( $k_{ov}$ ) pada penelitian ini. Dapat diamati pada **Gambar IV.11** dan **Gambar IV.12** bahwa  $k_{ov}$  meningkat pada peningkatan suhu dan penambahan promotor yang digunakan dimana  $k_{ov}$  pada penambahan promotor 5% dapat meningkatkan  $k_{ov}$  hingga 5.5 kali dibandingkan dengan penambahan promotor 1%.

Pada variabel penambahan 1% berat promotor pada suhu 313.15 K,  $k_{ov}$  yang paling besar adalah pada komposisi 2:1 sebesar  $6277 \text{ det}^{-1}$ , selanjutnya komposisi 1:0 sebesar  $3777 \text{ det}^{-1}$ , lalu komposisi 1:2 sebesar  $3442 \text{ det}^{-1}$ , selanjutnya komposisi 0:1 sebesar  $2949 \text{ det}^{-1}$ , dan terakhir komposisi 1:1 sebesar  $1185 \text{ det}^{-1}$ . Sedangkan untuk variabel penambahan 5% berat promotor yang paling besar adalah pada komposisi 1:0 sebesar  $39471 \text{ det}^{-1}$ , selanjutnya komposisi 1:1 sebesar  $19735 \text{ det}^{-1}$ , lalu komposisi 2:1 sebesar  $15713 \text{ det}^{-1}$ , selanjutnya komposisi 1:2 sebesar  $6824 \text{ det}^{-1}$ , dan yang paling rendah adalah komposisi 0:1 sebesar  $5601 \text{ det}^{-1}$ . Hasil perbandingan  $k_{ov}$  dengan laju absorpsi  $\text{CO}_2$  berbanding lurus. Hal ini dapat dijelaskan melalui fenomena absorpsi dan sesuai pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh Shen (2013) yang menyatakan bahwa penambahan asam amino yang digunakan pada penelitian ini memberikan pengaruh pada  $k_{ov}$ . Pada awalnya, penambahan ion hidroksil dan asam amino berada pada kondisi yang tinggi, begitu pula dengan laju penyerapan yang terjadi. Sehingga terjadi pula kenaikan laju absorpsi. Selain itu, kenaikan penambahan asam amino menghasilkan promosi laju reaksi yang ditandai dengan meningkatnya reaksi yang terjadi antara gugus asam amino dan  $\text{CO}_2$ .

#### IV.3 Persentase Jumlah $\text{CO}_2$ Terserap

Untuk mengetahui performa dari absorben yang digunakan pada penelitian ini, maka dilakukan perhitungan *yield*. *Yield* ini dihitung berdasarkan mol  $\text{CO}_2$  yang terserap / mol  $\text{CO}_2$  pada kondisi mula-mula. Konsentrasi mula-mula  $\text{CO}_2$  yang masuk

adalah  $4.02 \times 10^{-6}$  kmol. Contoh perhitungan pada penambahan 5% berat 1:1 (Arginine:glycine) pada suhu optimum 323.16 K adalah sebagai berikut:

$$\% recovery = \frac{mol CO_2 \text{ terserap}}{mol CO_2 \text{ mula} - \text{mula}} \times 100\%$$

$$\% recovery = \frac{4.02 \times 10^{-6}}{1.85 \times 10^{-7}} \times 100\%$$

$$\% recovery = 4.6 \%$$

Nilai % recovery pada variabel lain dapat dilihat pada tabel dan **Gambar 1V.13** di bawah ini:

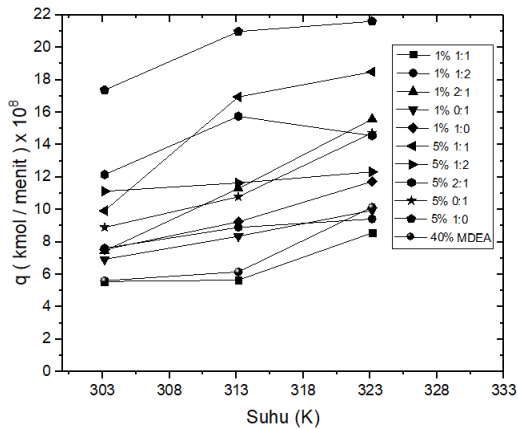
**Tabel IV. 2** Persentase *Recovery* pada berbagai variabel

T(K)	Recovery (%)				
	5% 1:1	5% 1:2	5% 2:1	5% 0:1	5% 1:0
<b>303.15</b>	2.47	2.77	3.02	2.21	4.32
<b>313.15</b>	4.22	2.90	3.92	2.68	5.22
<b>323.15</b>	4.60	3.07	3.62	3.66	5.37

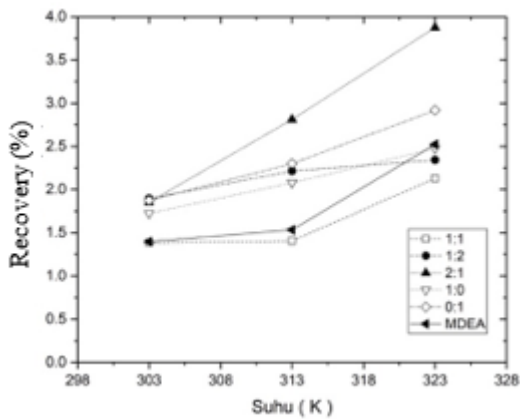
  

T(K)	Recovery (%)				
	1% 1:1	1% 1:2	1% 2:1	1% 0:1	1% 1:0
<b>303.15</b>	1.38	1.90	1.85	1.72	1.87
<b>313.15</b>	1.41	2.21	2.81	2.08	2.30
<b>323.15</b>	2.13	2.34	3.88	2.48	2.92

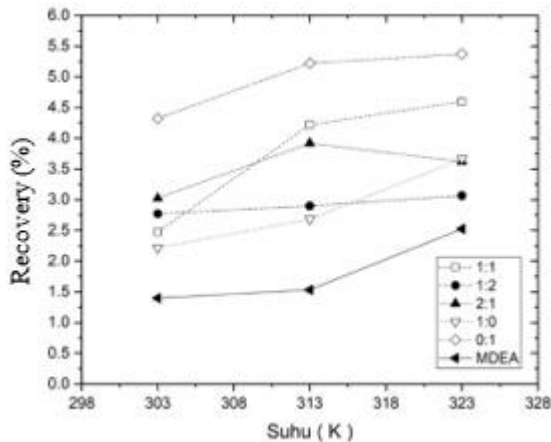




**Gambar IV. 13** Jumlah Mol CO<sub>2</sub> Terserap dalam Satu Menit



**Gambar IV. 14** Hubungan Persentase *Recovery* terhadap Suhu (K) pada MDEA + 1% berat promotor



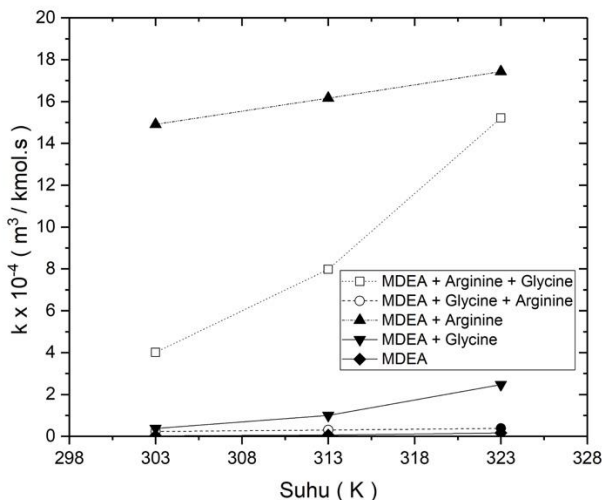
**Gambar IV. 15** Hubungan Persentase *Recovery* terhadap Suhu (K) pada MDEA + 5% berat promotor

Dapat diamati berdasarkan **Gambar IV.14** dan **IV.15** bahwa *percent recovery* MDEA menggunakan promotor jauh lebih baik daripada MDEA tanpa promotor. Persentase *recovery* terbaik yang didapat pada variabel penambahan 5% berat promotor asam amino pada komposisi campuran 1:0 di suhu 323 K dengan nilai 5.37%. Untuk komposisi campuran asam amino terbaik didapat pada variabel penambahan 1% berat promotor asam amino pada komposisi 1:1 di suhu 323 K dengan nilai 4.6%. Sedangkan persentase *recovery* terendah pada penambahan promotor 1% berat adalah pada variabel 1:1 dengan nilai 1.38% dan terendah pada penambahan promotor 5% berat adalah pada variabel 0:1 dengan nilai 2.21%. Hal ini sesuai dengan performa konstanta kinetik keseluruhan ( $k_{ov}$ ) yang telah didiskusikan sebelumnya.

#### IV.4 Konstanta Laju Reaksi

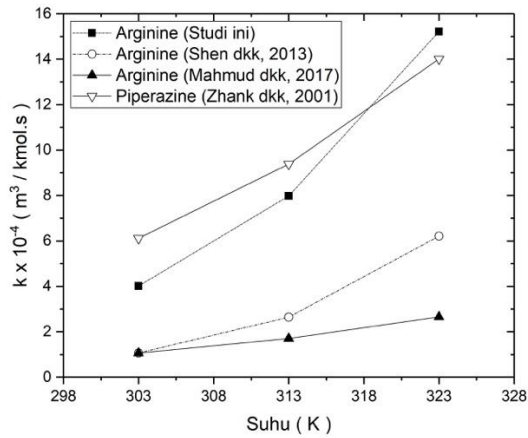
Konstanta laju reaksi pada penelitian ini didapat menggunakan metode Arrhenius dengan menganggap bahwa

reaksi terjadi pada keadaan *pseudo-first order*. Pada penelitian ini perhitungan dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak *Analysis Toolpak* pada *Microsoft Excel*. Adapun hasil perbandingan konstanta laju reaksi penelitian ini dengan beberapa penelitian yang telah dilakukan tersaji pada **Gambar** berikut:

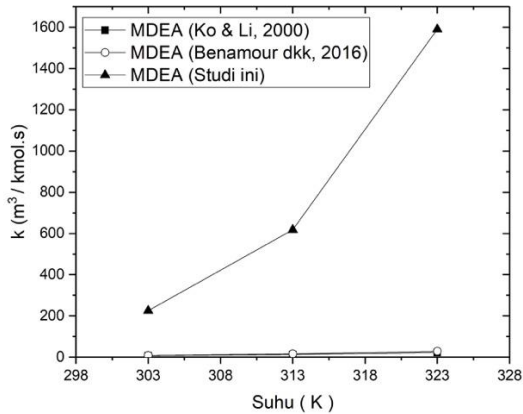


**Gambar IV. 16** Perbandingan Hubungan Nilai Konstanta (k) dengan Suhu (K) Pada Penelitian Ini

Adapun berdasarkan **Gambar IV.17** dapat disimpulkan bahwa nilai *karginine* murni memiliki nilai konstanta paling besar diikuti dengan nilai *karginine* kombinasi lalu sistem MDEA + glisin murni, diikuti dengan nilai konstanta MDEA + arginine murni dan nilai konstanta terendah yaitu  $k_{\text{MDEA}}$  tanpa promotor.



**Gambar IV. 17** Perbandingan Hubungan Nilai Konstanta ( $k$ ) Promotor dengan Suhu (K) Pada Beberapa Studi



**Gambar IV. 18** Perbandingan Hubungan Nilai Konstanta ( $k$ ) MDEA dengan Suhu (K) pada Beberapa Studi

Dengan  $k_{ov}$  yang cukup besar pada studi ini, nilai konstanta reaksi yang dihasilkan pun cukup baik bila dibandingkan studi-studi yang telah dilakukan sebelumnya. Data kinetik yang ditampilkan pada **Gambar IV.18** merupakan data yang didapat dari persamaan kinetika Arrhenius yang didapat pada penelitian ini sebagai berikut:

$$k_{MDEA-Arg-Gly} = 9.0992^{13} \exp\left(\frac{-6530.54}{T}\right)$$

$$k_{MDEA-Gly-Arg} = 5.7092^6 \exp\left(\frac{-2365.23}{T}\right)$$

$$k_{MDEA-Arg} = 1.8569^6 \exp\left(\frac{-764.553}{T}\right)$$

$$k_{MDEA-Gly} = 2.3537^{21} \exp\left(\frac{-12453.1}{T}\right)$$

Dari persamaan diatas dapat diamat bahwa konstanta kinetika dari campuran asam amino *arginin* menghasilkan nilai konstanta yang paling baik dibandingkan nilai konstanta *glycine* . Berikut merupakan ringkasan data kinetika yang telah diperoleh pada penelitian ini dibandingkan dengan beberapa penelitian sebelumnya.

**Tabel IV. 3** Ringkasan Nilai Konstanta Laju Reaksi

Sistem	Konstanta Laju Kinetik (m3/kmol.det)	Referensi
<b>MDEA</b>	$4.01 \times 10^8$ $\exp (-5400/T)$	Ko dan Li, 2000
<b>MDEA</b>	$2.564 \times 10^9$ $\exp (-5922/T)$	Benamour dkk., 2016
<b>Glycine</b>	$2.40 \times 10^7$ $\exp (-3887/T)$	Benamour dkk., 2016
<b>Glycine</b>	$3.29 \times 10^{13}$ $\exp (-8143.7/T)$	Mahmud dkk., 2017

<b>Arginine</b>	$2.81 \times 10^{10}$ $\exp (-4482.9/T)$	Mahmud dkk., 2017
<b>Arginine (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – Arginine)</b>	$2.58 \times 10^{16}$ $\exp (-8645/T)$	Shen dkk., 2013
<b>MDEA</b>	$1.14 \times 10^{16}$ $\exp (-9567.05/T)$	Studi ini
<b>Arginine (MDEA – Arginine)</b>	$1.73 \times 10^{14}$ $\exp (-6660.33/T)$	Studi ini
<b>Glycine (MDEA – Glycine)</b>	$5.21 \times 10^{16}$ $\exp (-9169.86/T)$	Studi ini
<b>Arginine (MDEA – Arginine – Glycine)</b>	$9.1 \times 10^{13}$ $\exp (-6530.54/T)$	Studi ini
<b>Glycine (MDEA – Glycine – Arginine)</b>	$5.71 \times 10^6$ $\exp (-2365.23/T)$	Studi ini

Penelitian ini hanya dilakukan hingga suhu 50° C (323.15 K) karena ketika suhu mencapai 57°C (330.15 K) maka kelarutan akan menjadi faktor utama dalam menentukan laju absorpsi (Bullin, 1990).

Bada dasarnya, asam amino dapat digunakan untuk reaksi penyerapan gas CO<sub>2</sub> tanpa menggunakan MDEA. Namun, MDEA memiliki nilai muatan CO<sub>2</sub> yang tinggi karena pembentukan ion bikarbonat dan karbamat sehingga lebih efektif digunakan (Barzagli dkk., 2010). Selain itu, panas yang dibutuhkan untuk reaksi dengan gas asam rendah sehingga membutuhkan energi yang rendah pada regenerasinya (Dave dkk., 2009), dan degradasi larutan yang rendah (Aroonwilas dkk., 2004). Apabila ditinjau dari keekonomisan bahan, harga asam amino jauh lebih tinggi dibandingkan dengan harga MDEA. Sehingga, asam amino lebih efektif digunakan menjadi promotor dengan persentase berat yang sedikit. Perbandingan harga dapat dilihat di bawah ini:

- Harga L-arginine : Rp 1,480,000.00 / Kg

- Harga Glycine : Rp 1,828,522.00 / Kg  
(Sigma-Aldrich)
- Harga MDEA : Rp 25,500.00 / Kg  
([www.molbase.com](http://www.molbase.com))

## BAB V

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian kinetika reaksi absorpsi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) kedalam larutan *Methyldiethanolamine* (MDEA) berpromotor *arginine* dan *glycine* menggunakan peralatan *Wetted Wall Column* (WWC) dengan konsentrasi MDEA sebesar 40% berat pada temperatur 303.15 K hingga 323.15 K, dapat disimpulkan bahwa :

- a. Persamaan kinetika reaksi absorpsi CO<sub>2</sub> (m<sup>3</sup>/kmol.det) yang didapatkan adalah:
  - $k_{\text{Arginine}} = 9.1 \times 10^{13} \exp(-6530.54/T)$  (sistem MDEA-Arginine-Glycine)
  - $k_{\text{Glycine}} = 5.71 \times 10^6 \exp(-2365.23/T)$  (sistem MDEA-Arginine-Glycine)
  - $k_{\text{Arginine murni}} = 1.73 \times 10^{14} \exp(-6660.33/T)$  (sistem MDEA-Arginine)
  - $k_{\text{Glycine murni}} = 5.21 \times 10^{16} \exp(-9169.86/T)$  (sistem MDEA-Glycine)
  - $k_{\text{MDEA}} = 1.146 \times 10^{16} \exp(-9567.0532/T)$  (sistem MDEA)
- b. Peningkatan laju absorpsi dipengaruhi oleh:
  - Peningkatan temperatur operasi meningkatkan laju absorpsi CO<sub>2</sub>. Semakin tinggi temperatur operasi maka laju absorpsi akan semakin meningkat.
  - Penambahan promotor kedalam larutan MDEA dapat meningkatkan laju absorpsi CO<sub>2</sub> secara signifikan. Semakin banyak penambahan promotor maka laju absorpsi akan semakin meningkat. Namun, belum dapat disimpulkan komposisi campuran promotor yang paling reaktif karena adanya perbedaan hasil antara 1% berat



dengan 5% berat. Hal ini diduga terjadi karena pengaruh interaksi antara *arginine* dan *glycine* yang perlu diteliti lebih lanjut.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdeen, F.R.H. et al., 2016. A review of chemical absorption of carbon dioxide for biogas upgrading. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 24(6), pp.693–702. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cjche.2016.05.006>.
- Adekunle, K.F. & Okolie, J.A., 2015. A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. , (March), pp.205–212.
- Altway, Ali. (2008). *Perpindahan massa disertai reaksi kimia*. Jakarta: Bee Marketer Institut.
- Andriani, D. et al., 2014. A review on optimization production and upgrading biogas through CO<sub>2</sub> removal using various techniques. *Appl Biochem Biotechnol*, 172(4), pp.1909–1928. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24293277>.
- Barzagli, F., Mani, F. & Peruzzini, M., 2013. International Journal of Greenhouse Gas Control Efficient CO<sub>2</sub> absorption and low temperature desorption with non-aqueous solvents based on 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP ). *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 16, pp.217–223. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.03.026>.
- Benamor, A. et al., 2017. International Journal of Greenhouse Gas Control Reaction kinetics of carbon dioxide with aqueous solutions of L -Arginine , Glycine & Sarcosine using the stopped flow technique. , 63(November 2016), pp.47–58.
- Benamor, A. et al., 2016. Journal of Natural Gas Science and Engineering Reaction kinetics of carbon dioxide in aqueous blends of N- methyldiethanolamine and glycine using the stopped flow technique. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 33, pp.186–195. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2016.04.063>.
- Bishnoi, S. & Rochelle, G.T., 2002. Absorption of Carbon

- Dioxide in Aqueous Piperazine/Methyldiethanolamine. *AIChE J.*, 48(12), pp.2788–2799. Available at: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie402570u>.
- Bullin, J.A and Polasek J.C. (1990). *The Use of MDEA and Mixtures of Amines for CO<sub>2</sub> Removal*. Bryan Research and Engineering, Inc, 135-139
- Cavenati, S. et al., 2008. Metal Organic Framework Adsorbent for Biogas Upgrading. , pp.6333–6335.
- Danckwerts, P.V. (1970). *Gas-liquid reactions*. New York: McGraw-Hill.
- Elizabeth, R. et al., 2008. Efektivitas Pemanfaatan Biogas Sebagai Sumber Bahan Bakar Dalam Mengatasi Biaya Ekonomi Rumah Tangga Di Perdesaan. , pp.220–234.
- Faiz R, and Al-Marzouqi M. (2011). *Insights on natural gas purification: Simultaneous absorption of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S using MEA in hollow fiber membrane contactors*. *Journal of Separation and Purification Technology*, 76, 351-361.
- Geankoplis, Christie J. (1997). *Transport processes and unit operations 3rd edition*. New Delhi: Prentice-Hall of India
- Gimeno, M. P., Mayoral, M.C., and Andres, J. M. (2013). *Influence of temperature on CO<sub>2</sub> absorption rate and capacity in ionic liquids*. Zaragoza : ICB-CSIC
- Gimeno, M. P., Mayoral, M.C., and Andres, J. M. (2013). *Influence of temperature on CO<sub>2</sub> absorption rate and capacity in ionic liquids*. Zaragoza : ICB-CSIC
- Haider, M.B., Hussain, Z. & Kumar, R., 2016. CO<sub>2</sub> absorption and kinetic study in ionic liquid amine blends. *Journal of Molecular Liquids*, 224, pp.1025–1031. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2016.10.044>.
- Haimour, N., Bidarian, A. & Sandall, O.C., 1987. Kinetics of the reaction between carbon dioxide and methyldiethanolamine. *Chemical Engineering Science*, 42(6), pp.1393–1398.

- Harasimowicz, M. et al., 2007. Application of polyimide membranes for biogas purification and enrichment. , 144, pp.698–702.
- Hoff, Karl Anders (2003). *Modeling and experimental study of carbon dioxide absorption in a membran contactor*. Norwegian University of Science and Technology, 43(16), 99-101.
- Holst, J. van et al., 2009. Kinetic study of CO<sub>2</sub> with various amino acid salts in aqueous solution. *Chemical Engineering Science*, 64(1), pp.59–68.
- Holst, J. Van et al., 2008. Physiochemical Properties of Several Aqueous Potassium Amino Acid Salts Physiochemical Properties of Several Aqueous Potassium Amino Acid Salts.
- Idem, R. et al., 2006. Pilot plant studies of the CO<sub>2</sub> capture performance of aqueous MEA and mixed MEA/MDEA solvents at the University of Regina CO<sub>2</sub> capture technology development plant and the boundary dam CO<sub>2</sub> capture demonstration plant. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 45(8), pp.2414–2420.
- Kasikamphaiboon, P. et al., 2013. Simultaneous removal of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S using MEA solution in a packed column absorber for biogas upgrading. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 35(6), pp.683–691. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.014>.
- Kierzkowska-pawlak, H., Siemieniec, M. & Chacuk, A., 2011. Reaction Kinetics of CO<sub>2</sub> in Aqueous Methyldiethanolamine Solutions Using the Stopped - Flow Technique. , 33(1), pp.7–18.
- Ko, Jiun-Jie and Li, Meng-Hui. (2000). *Kinetics of absorption of carbon dioxide into solutions of N-Methyldiethanolamine + water*. *Chemical Engineering Science*, 55(19), 161-175.
- Kumar, P.S., Hogendoorn, J.A., and Versteeg, G.F. (2003). *Kinetics of the reaction of CO<sub>2</sub> with aqueous potassium salt of taurine and glycine*. *AIChE J.*, 49, 203–213.

- Lin, S.H and Shyu, C.T. (1999). *Performance characteristics and modeling of carbon dioxide absorption by amines in a packed column*. *Waste Management*, 19, 255-262.
- Moreno, B., Groppelli, E.S. & Campanella, E.A., 2017. Evaluation of biogas upgrading technologies using a response surface methodology for process simulation. *Journal of Cleaner Production*, 141, pp.978–988. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.167>.
- Olajire, A.A., 2010. CO<sub>2</sub> capture and separation technologies for end-of-pipe applications e A review. *EGY*, 35(6), pp.2610–2628. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.030>.
- Sema, T. et al., 2012. Comprehensive mass transfer and reaction kinetics studies of CO<sub>2</sub> absorption into aqueous solutions of blended MDEA-MEA. *Chemical Engineering Journal*, 209, pp.501–512. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2012.08.016>.
- Shen, S. et al., 2013. Kinetic study of carbon dioxide absorption with aqueous potassium carbonate promoted by arginine. *Chemical Engineering Journal*, 222, pp.478–487. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2013.02.093>.
- Sreekrishnan, T.R., Kohli, S. & Rana, V., 2004. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques — a review. , 95, pp.1–10.
- Tan, L.S. et al., 2012. Factors affecting CO<sub>2</sub> absorption efficiency in packed column: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18(6), pp.1874–1883. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2012.05.013>.
- Wang, M. et al., 2010. Chemical Engineering Research and Design Post-combustion CO<sub>2</sub> capture with chemical absorption : A state-of-the-art review. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(9), pp.1609–1624. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2010.11.005>.
- Weinsenberger, S. and Schumpe, A. (1996). *Estimation of gas*

- solubilities in salt solutions at temperatures from 273 K to 363 K. AIChE Journal*, 42(1)
- Wilke, C. R., and Chang, Pin. (1955). *Correlation of diffusion coefficient in dilute solutions. AIChE Journal*, 1.
- Yi, F. et al., 2009. Modeling and experimental studies on absorption of CO<sub>2</sub> by Benfield solution in rotating packed bed. , 145, pp.377–384.
- Yousef, A.M.I. et al., 2016. Upgrading biogas by a low-temperature CO<sub>2</sub> removal technique. *Alexandria Engineering Journal*, 55(2), pp.1143–1150. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2016.03.026>.

## DAFTAR NOTASI

$d$	Diameter pipa yang dialiri liquida (m)
$D_{AG}$	Koefisien difusi gas CO <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> det <sup>-1</sup> )
$D_{AL}$	Diffusivitas CO <sub>2</sub> dalam H <sub>2</sub> O, (m <sup>2</sup> det <sup>-1</sup> )
$D_{BL}$	Diffusivitas MDEA dalam H <sub>2</sub> O, (m <sup>2</sup> det <sup>-1</sup> )
$E$	Energi aktivasi (kg m <sup>-2</sup> det <sup>2</sup> )
$E_i$	<i>Enhancement factor</i>
$g$	Percepatan gravitasi (m s <sup>-2</sup> )
$h$	Tinggi kolom (m)
$h$	Kekuatan ionic total larutan (m <sup>3</sup> /kmol)
$h_+, h_-, h_G$	Kontribusi ion positif, negatif dan gas terhadap faktor kelarutan (m <sup>3</sup> kmol <sup>-1</sup> )
$Ha$	Bilangan Hatta
$He$	Konstanta Henry (Pa m <sup>3</sup> kmol <sup>-1</sup> )
$He^0$	Konstanta Henry untuk sistem gas-cair (Pa m <sup>3</sup> kmol <sup>-1</sup> )
$I$	Kekuatan ionik larutan (ion m <sup>3</sup> )
$k_{app}$	Konstanta reaksi orde satu semu (det <sup>-1</sup> )
$k_{ov}$	Konstanta laju reaksi <i>overall pseudo first order</i> (det <sup>-1</sup> )
$k_{MDEA}$	Konstanta laju reaksi antara MDEA dengan CO <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> kmol <sup>-1</sup> det <sup>-1</sup> )
$k_{OH-}$	Konstanta laju reaksi dari reaksi (2.19) (m <sup>3</sup> kmol <sup>-1</sup> det <sup>-1</sup> )
$k_{H_2O}$	Konstanta laju reaksi dari reaksi (2.18) (det <sup>-1</sup> )
$k_{arg}$	Konstanta laju reaksi untuk <i>arginine</i> (m <sup>3</sup> kmol <sup>-1</sup> det <sup>-1</sup> )
$k_{gky}$	Konstanta laju reaksi untuk <i>glycine</i> (m <sup>3</sup> kmol <sup>-1</sup> det <sup>-1</sup> )
$k_{app \text{ arginine}}$	Konstanta reaksi orde satu semu antara <i>arginine</i> dan CO <sub>2</sub> (det <sup>-1</sup> )
$k_g$	Koefisien perpindahan massa sisi gas (kmol m <sup>-2</sup> det <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup> )

$k_L$	Koefisien perpindahan massa sisi cairan, ( $\text{kmol m}^{-2} \text{ det}^{-1}$ )
$K_1$	Konstanta kesetimbangan ionisasi pertama dari reaksi (2.14) ( $\text{kmol m}^{-3}$ )
$K_2$	Konstanta kesetimbangan ionisasi kedua dari reaksi (2.15) ( $\text{kmol m}^{-3}$ )
$K_3$	Konstanta kesetimbangan ionisasi ketiga dari reaksi (2.17)
$K_4$	Konstanta kesetimbangan ionisasi keempat dari reaksi (2.16) ( $\text{m}^3 \text{ kmol}^{-1}$ )
$K_w$	Konstanta kesetimbangan ionisasi air (2.13) ( $\text{kmol}^2 \text{ m}^{-6}$ )
$M_B$	Berat molekul pelarut ( $\text{kg mol}^{-1}$ )
$n$	Orde reaksi
$P_A$	Tekanan parsial $\text{CO}_2$ (Pa)
$P_{Ai}$	Tekanan parsial $\text{CO}_2$ pada <i>interface</i> (Pa)
$q$	Laju absorpsi total ( $\text{kmol det}^{-1}$ )
$Q$	Jumlah gas yang terabsorpsi ( $\text{kmol m}^{-2}$ )
$r_{ov}$	Laju reaksi overall ( $\text{kmol m}^{-3} \text{ det}^{-1}$ )
$R$	Konstanta gas ( $\text{m}^3 \text{ Pa kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )
$\bar{R}$	Laju absorpsi per satuan luas setelah waktu kontak $t$ ( $\text{kmol m}^{-2} \text{ det}^{-1}$ )
$R$	Laju reaksi gas ( $\text{kmol m}^{-3} \text{ det}^{-1}$ )
$Re$	<i>Reynold number</i>
$Sc$	<i>Schmidt number</i>
$Sh$	<i>Sherwood number</i>
$t_c$	Waktu kontak gas terhadap permukaan (det)
$T$	Temperatur (K)
$U$	Distribusi kecepatan film liquid ( $\text{m det}^{-1}$ )
$U_s$	Kecepatan di permukaan film ( $\text{m det}^{-1}$ )
$V_A$	Volume molar ( $\text{m}^3 \text{ kmol}^{-1}$ )
$v$	Laju alir liquida ( $\text{m}^3 \text{ det}^{-1}$ )
$x$	Jarak dari permukaan film cairan (m)
$Z_i$	Valensi ion



Z Koefisien mol reaktan yang bereaksi dengan 1 mol gas terlarut

**Huruf Latin**

$\delta$  Tebal *film* cairan (m)  
 $\rho$  Densitas liquida ( $\text{kg m}^{-3}$ )  
 $\mu$  Viskositas liquida ( $\text{kg m}^{-1} \text{det}^{-1}$ )  
 $\varphi$  Parameter asosiasi pelarut  
 $\Gamma$  *Mass velocity liquid* ( $\text{kg/m.s}$ )

## APPENDIKS A

### A.1 Menentukan Keadaan *Steady State*

Keadaan *steady state* merupakan kondisi dimana tidak ada perubahan pH dan tidak dipengaruhi oleh waktu. Berdasarkan penelitian didapatkan hubungan pH tiap waktunya (per menit) seperti yang didapatkan sebagai berikut :

**Tabel A. 1** Data pengukuran pH larutan per menit

Waktu (menit)	pH
1	10.55
2	10.68
3	10.75
4	10.75
5	10.75

Berdasarkan **Tabel A.1**, dapat diketahui bahwa kondisi *steady state* dicapai pada waktu  $t = 5$  menit. Sehingga pengambilan sampel pada konsentrasi dan suhu tertentu ini dilakukan pada saat  $t = 5$  menit. Keadaan *steady state* dicari pada setiap pergantian variable konsentrasi dan suhu.

### A.2 Analisa Data

Berikut adalah contoh perhitungan hasil eksperimen pada variabel konsentrasi promotor *arginine* (0,5% berat) dan *glycine* (0.5% berat) 1%, laju alir pelarut 200 mL/menit pada temperatur 30°C (303.15 K).

#### ***Analisa Larutan Sebelum Kontak :***

Untuk menganalisa adanya kandungan bikarbonat dalam larutan, dilakukan pengendapan bikarbonat pada sampel dengan menggunakan larutan  $\text{BaCl}_2$  (0.5 M). setelah mengedap,

ditambahkan larutan asam klorida (HCl) untuk melarutkan endapan tersebut. Lalu dilanjutkan dengan titrasi menggunakan natrium hidroksida (NaOH) dengan indikator MO. Perhitungan mol bikarbonat mula-mula sebelum kontak adalah sebagai berikut :

Dari hasil titrasi dapat dihitung mol bikarbonat mula – mula dalam 5 mL sampel larutan yaitu :

Volume sampel larutan : 5 mL  
 Konsentrasi NaOH : 0.05136986 M  
 Volume HCl : 20 mL  
 Volume NaOH ( $V_{NaOH}$ )<sub>MO awal</sub> : 14.3 mL

Dari hasil titrasi dapat dihitung mol bikarbonat mula – mula dalam 5 mL sampel larutan yaitu :

$$\begin{aligned}
 [HCO_3^-]_{\text{mula-mula}} &= \frac{(V_{HCl} - V_{NaOH}) \times M_{NaOH} \times \text{faktor pengenceran}}{2(V_{\text{sampel}})} \\
 &= \frac{(20 \text{ mL} - 14.3 \text{ mL}) \times 0.05136986 \times 1}{2(5) \text{ mL}} \\
 &= 0.02980822 \text{ mol/L}
 \end{aligned}$$

### ***Analisa Larutan Setelah Kontak:***

Untuk menganalisa adanya kandungan bikarbonat akhir dalam larutan, dilakukan titrasi dengan cara yang sama yaitu dengan menggunakan natrium hidroksida (NaOH) dengan indikator MO.

Dari hasil titrasi dapat dihitung mol bikarbonat setelah kontak dalam 5 mL sampel larutan yaitu :

Volume sampel larutan : 5 mL  
 Konsentrasi NaOH : 0.05136986 M  
 Volume HCl : 20 mL  
 Volume NaOH ( $V_{NaOH}$ )<sub>MO</sub> : 11.05 mL

Dari hasil titrasi dapat dihitung mol bikarbonat mula – mula dalam 5 mL sampel larutan yaitu :

$$\begin{aligned}
 [HCO_3^-] &= \frac{(V_{HCl} - V_{NaOH}) \times M_{NaOH} \times \text{faktor pengenceran}}{2(V_{\text{sampel}})}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{(20 \text{ mL} - 11.05 \text{ mL}) \times 0.05136986 \times 1}{2(5) \text{ mL}}$$

$$= 0.045976027 \text{ mol/L}$$

### ***Menentukan Waktu Kontak***

$$t_c = \frac{h}{U_s} = \frac{2h}{3} \left[ \frac{3\mu}{g\rho} \right]^{1/3} \left[ \frac{\pi d}{v} \right]^{2/3}$$

dimana,

$$h = 0.093 \text{ m}$$

$$\mu_{\text{larutan}} = 0.00412035 \text{ kg/m.s (30 °C)}$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$\rho_{\text{larutan}} = 1033.58666 \text{ kg/m}^3 \text{ (30 °C)}$$

$$d = 0.013 \text{ m}$$

$$v = 200 \text{ ml/menit} \approx 3.333 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det}$$

$$\pi = 3.14$$

Sehingga waktu kontak antara gas dengan larutan adalah :

$$t_c =$$

$$\frac{2(0.093 \text{ m})}{3} \left[ \frac{3(0.00412035 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}})}{(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(1033.5866 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})} \right]^{1/3} \left[ \frac{(3.14)(0.013 \text{ m})}{(3.333 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det})} \right]^{2/3}$$

$$= 0.3519 \text{ detik}$$

### ***Menentukan Laju Absorpsi Gas CO<sub>2</sub> (q)***

$$\text{Laju alir pelarut (v)} = 200 \text{ ml/menit} = 3.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det}$$

$$[HCO_3^{2-}]_{\text{mula-mula}} = 0.0298 \text{ mol/L}$$

$$[HCO_3^{2-}]_{\text{akhir}} = 0.0459 \text{ mol/L}$$

Sehingga laju absorpsi gas CO<sub>2</sub> adalah :

$$q = v \times ([HCO_3^{2-}]_{\text{akhir}} - [HCO_3^{2-}]_{\text{mula-mula}})$$

$$= (3.33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{det}) \times [(0.0459 \text{ mol/L}) - (0.0298 \text{ mol/L})]$$

$$= 5.565 \times 10^{-8} \text{ kmol/det}$$

### ***Menentukan Laju Rata-Rata Absorpsi Selama t Waktu***

$$\frac{Q(t)}{t} = \frac{q}{\pi dh}$$

dimana,

$$q = 5.565 \times 10^{-8} \text{ kmol/det}$$

$$d = 0.013 \text{ m}$$

$$h = 0.093 \text{ m}$$

Maka, laju rata-rata absorpsi yang didapat selama t waktu

( $Q(t)/t$ ) adalah :

$$\begin{aligned} \frac{Q(t)}{t} &= \frac{5.565 \times 10^{-8} \text{ kmol/det}}{(3.14)(0.013 \text{ m})(0.093 \text{ m})} \\ &= 1.4569 \times 10^{-5} \text{ kmol/m}^2 \cdot \text{det} \end{aligned}$$

### ***Menentukan Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> Terlarut ([CO<sub>2</sub>]<sub>e</sub>) dan [OH<sup>-</sup>]***

$$K_W = \exp \left( 39,555 - \frac{9,879 \times 10^4}{T} + \frac{5,6883 \times 10^7}{T^2} - \frac{1,465 \times 10^{10}}{T^3} + \frac{1,3615 \times 10^{12}}{T^4} \right)$$

$$K_1 = 10^{-\frac{3404,7}{T} + 6,966 \times 10^{14} - 10^{0,03279T}}$$

$$K_2 = \exp \left( -294,74 + \frac{3,6439 \times 10^5}{T} - \frac{1,8416 \times 10^8}{T^2} + \frac{4,1579 \times 10^{10}}{T^3} - \frac{3,5429 \times 10^{12}}{T^4} \right)$$

$$K_4 = e^{\left( 32,259 - \frac{0,0424}{T} \right)}$$

$$K_3 = K_1 \times K_4$$

Didapatkan nilai  $K_W = 1.4533 \times 10^{-14} \text{ kmol}^2/\text{m}^6$ ,  $K_1 = 4.6343 \times 10^{-7} \text{ kmol/m}^3$ ,  $K_2 = 5.1313 \times 10^{-11} \text{ kmol/m}^3$ ,  $K_4 = 2.7 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{kmol}$ , dan  $K_3 = 125.3208$ . Sehingga konsentrasi CO<sub>2</sub> terlarut pada temperatur 303.15 K adalah :

$$[OH^-] = \frac{K_W}{K_2} \frac{[CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = \frac{1.4533 \times 10^{-14}}{5.1313 \times 10^{-11}} \frac{(0.0236)}{(0.0224)} = 0.000298 \text{ kmol/m}^3$$

$$[CO_2]_e = \frac{K_2 K_4}{K_3} \frac{[HCO_3^-]^2}{[CO_3^{2-}]}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{5.1313 \times 10^{-11} \times 2.7 \times 10^9 (0.0224)^2}{125.3208 (0.0236)} \\
 &= 2.3593 \times 10^{-6} \text{ kmol/m}^3
 \end{aligned}$$

### **Menentukan Konstanta Henry**

Harga konstanta Henry didapat dari persamaan berikut :

$$\log\left(\frac{He}{He^0}\right) = h_1 I_1 + h_2 I_2$$

dimana,  $He^0$  adalah konstanta henry untuk sistem gas-cair dan I adalah kekuatan ionic dari larutan yang diperoleh dari :

$$He^0 = H_{e298} \exp\left[\frac{-d \ln kH}{d\left(\frac{1}{T}\right)} * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right]$$

$$I = \frac{1}{2} \sum C_i Z_i^2$$

$C_i$  adalah konsentrasi ion – ion yang valensinya  $Z_i$ .

$$h = h_+ + h_- + h_G$$

$$h_G = h_{G,0} + h_T(T-298.15)$$

Namun pada pelarut MDEA ini tidak terionisasi sehingga  $I=0$

$$\log\left(\frac{He}{He^0}\right) = 0$$

$$He = He^0$$

Sehingga, konstanta Henry dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 He^0 &= 3.3 \times 10^{-5} \exp(2200 * (1/303.15 - 1/298)) \\
 &= 2.88 \times 10^{-5} \text{ mol/cm}^3 \cdot \text{atm} \\
 &= 2.88 \times 10^{-7} \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{Pa} \\
 &= 3474605.907 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa/kmol}
 \end{aligned}$$

### **Menentukan Diffusivitas $CO_2$ dan $CO_3^{2-}$**

- Diffusivitas  $CO_2$  dan  $CO_3^{2-}$  dalam air dapat dihitung menggunakan persamaan Wilke Chang (Wilke dan Chang, 1955) sebagai berikut :

$$D_{AL (CO_2-H_2O)} = 1,173 \times 10^{-16} \sqrt{(\varphi M_B)} \frac{T}{\mu_B V_A^{0,6}}$$

dimana,

$\varphi$  = Association parameter dari pelarut (water = 2.6)

$M_B$  = Berat molekul pelarut (kg/kmol)

$T$  = Temperatur (K)

$\mu_B$  = Viskositas pelarut (kg/m.s)

$V_A$  = Solute molar volume ( $m^3$ /kmol)

$$\begin{aligned} D_{AL (CO_2-H_2O)} &= 1.173 \times 10^{-16} \sqrt{(\varphi M_B)} \frac{T}{\mu_B V_A^{0,6}} \\ &= 1.173 \times 10^{-16} \sqrt{(2.6) \left(18 \frac{kg}{kmol}\right)} \times \frac{303.15 K}{(0.0008007 \frac{kg}{m.s})(0.034 m^3/kmol)^{0.6}} \\ &= 2.3106 \times 10^{-9} m^2/det \end{aligned}$$

\*Dengan cara yang sama, didapatkan  $D_{BL (CO_3^{2-}-H_2O)}$  sebesar  $9.5252 \times 10^{-10} m^2/det$ .

- Diffusivitas  $CO_2$  dalam gas  $N_2$  didapat dari Tabel 6.2-1 (Geankoplis,1993) pada temperatur 298 K sebesar  $1.67 \times 10^{-5} m^2/det$ , sehingga perlu dilakukan koreksi temperatur sebagai berikut:

$$\left(\frac{D_{AG,T}}{D_{AG,T_o}}\right) = \left(\frac{T}{T_o}\right)^{1,75}$$

Sehingga, diffusivitas  $CO_2$  dalam gas  $N_2$  ( $D_{AG}$ ) pada temperatur  $30^\circ C$  (303.15 K) adalah:

$$\begin{aligned} \left(\frac{D_{AG, 303.15 K}}{1.67 \times 10^{-5}}\right) &= \left(\frac{303.15 K}{298.15 K}\right)^{1,75} \\ (D_{AG, 303.15 K}) &= \left(\frac{303.15 K}{298.15 K}\right)^{1,75} \times 1.67 \times 10^{-5} \\ (D_{AG, 303.15 K}) &= 1.719 \times 10^{-5} m^2/det \end{aligned}$$

### **Menentukan Koefisien Perpindahan Massa sisi Gas ( $k_G$ )**

$$k_g = \frac{Sh D_{AG}}{R T d}$$

dimana,

$$\begin{aligned} Sc &= \text{Schmidt number} = \frac{\mu_g}{\rho_g D_{AG}} \\ &= \frac{1.8038 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}}{1.3197 \frac{kg}{m^3} \times 1.719 \times 10^{-5} m^2/det} = 0.7949 \end{aligned}$$

$$v = \frac{4 Q_G}{\pi \times d^2} = \frac{4 \times (0.0001 \frac{m^3}{s})}{\pi \times (0.013 m)^2} = 0.753778 \frac{m}{s}$$

dimana  $Q_G$  (laju alir gas) = 6 L/min = 0.0001 m<sup>3</sup>/s

$$\begin{aligned} Re &= \text{Reynold number} \\ &= \frac{\rho_g v d}{\mu_g} \\ &= \frac{1.3197 \frac{kg}{m^3} \times 0.753778 \frac{m}{s} \times 0.013 m}{1.8038 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}} \\ &= 716.939 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Sh &= \text{Sherwood number} \\ &= 1.075 (Re Sc \frac{d}{h})^{0.85} \\ &= 1.075 (716.939 \times 0.7949 \times \frac{0.013 m}{0.093 m})^{0.85} \\ &= 44.4126 \end{aligned}$$

Sehingga,

$$\begin{aligned} k_g &= \frac{44.4126 \times 1.719 \times 10^{-5} m^2/det}{8314 \frac{m^3 Pa}{kmol.K} \times 303.15 K \times 0.013 m} \\ &= 3.2577 \times 10^{-9} kmol/s.m^2.Pa \end{aligned}$$

### ***Menentukan Koefisien Perpindahan Massa Sisi Cairan ( $k_L$ )***

$$k_L = \sqrt{\frac{4 \times D_{AL} \times V_{max}}{\pi h}}$$

dimana,

$k_L$  = Koefisien perpindahan massa sisi cairan, (kmol/s.m<sup>2</sup>)

$D_{AL}$  = Difusifitas liquid (m<sup>2</sup>/det)

$V_{max}$  = kecepatan liquid max pada aliran (m/s)

$h$  = Panjang area kontak, (m)

$\rho_L$  = Liquid density, (kg/m<sup>3</sup>)



$\mu$  = Viskositas liquid, (kg/m.s)

$g$  = Gravity acceleration, (9.80665 m/s<sup>2</sup>)

dimana dibutuhkan:

$$\delta = \left[ \frac{3\pi \vartheta}{\rho g \pi D} \right]^{1/3}$$

$\vartheta$ , laju Larutan =  $3.33 \times 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/det, sehingga :

$$\delta = \left[ \frac{3 \times 3.14 \times 3.33 \times 10^{-6}}{1033.59 \frac{kg}{m^3} \times 9.8 \frac{m}{s^2} \times 3.14 \times 0.0013} \right]^{1/3}$$

$$\delta = 0.000463516 \text{ m}$$

$V_{max}$  dapat diperoleh:

$$V_{max} = \frac{\rho g \delta^2}{2\pi}$$

$$V_{max} = \frac{1033.59 \frac{kg}{m^3} \times 9.8 \frac{m}{s^2} \times 0.000463516^2}{2 \times 0.00412 \frac{kg}{m \cdot s}}$$

$$V_{max} = 0.26426 \frac{m}{s}$$

$$k_L = \sqrt{\frac{4 \times D_{AL} \times V_{max}}{\pi h}}$$

$$k_L = \sqrt{\frac{4 \times 2.3106 \times 10^{-9} \times 0.26426}{3.14 \times 0.093}}$$

$$k_L = 9.145 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

***Menentukan Konsentrasi  $CO_2$  dalam Interface ( $[CO_2]_i$ ) dan Konstanta Laju Reaksi Overall Pseudo First Order ( $k_{ov}$ )***

$$[CO_2]_i = \frac{k_g P_A + [CO_2]_e \sqrt{D_{AL} k_{ov}}}{k_g H_e + \sqrt{D_{AL} k_{ov}}} \dots\dots\dots (a)$$

$$\frac{Q}{t} = \bar{R} = ([CO_2]_i - [CO_2]_e) \sqrt{D_{AL} \times k_{ov}} \dots\dots\dots (b)$$

dimana,

$k_g$  = Koefisien perpindahan massa sisi gas, (kmol/s.m<sup>2</sup>.Pa)

$P_A$  = Tekanan parsial gas  $CO_2$ , (Pa)

$D_{AL}$  = Koefisien difusi gas  $CO_2$ , (m<sup>2</sup>/det)

He = Konstanta Henry , (Pa.m<sup>3</sup>/kmol)  
 $[CO_2]_e$  = Konsentrasi gas CO<sub>2</sub> berkesetimbangan dalam cairan, (kmol/m<sup>3</sup>)

$$\text{Misal : } \phi = \sqrt{D_{AL} \times k_{ov}}$$

Substitusikan pers (a) → (b)

$$\begin{aligned} \frac{Q}{t} &= \left( \frac{k_g P_A + [CO_2]_e \phi}{k_g H_e + \phi} - [CO_2]_e \right) \phi \\ &= \left( \frac{k_g P_A + [CO_2]_e \phi - [CO_2]_e k_g H_e - [CO_2]_e \phi}{k_g H_e + \phi} \right) \phi \\ &= \left( \frac{k_g P_A - [CO_2]_e k_g H_e}{k_g H_e + \phi} \right) \phi \\ \frac{Q}{t} k_g H_e + \frac{Q}{t} \phi &= k_g P_A \phi - [CO_2]_e k_g H_e \phi \\ \phi &= \frac{\frac{Q}{t} k_g H_e}{k_g P_A - [CO_2]_e k_g H_e - \frac{Q}{t}} \end{aligned}$$

$$\frac{1.4559 \times 10^{-5} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \text{s}} \times 3.2577 \times 10^{-9} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \text{Pa.s}} \times 3.47 \times 10^6 \frac{\text{m}^3 \text{Pa}}{\text{kmol}}}{3.2577 \times 10^{-9} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \text{Pa.s}} \times 40530 \text{ Pa} - 2.3593 \times 10^{-6} \times 3.2577 \times 10^{-9} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \text{Pa.s}} \times 3.47 \times 10^6 \frac{\text{m}^3 \text{Pa}}{\text{kmol}} - 1.4559 \times 10^{-5} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \text{s}}} \phi = 0.0014 \text{ m/det}$$

Sehingga,

$$\begin{aligned} \phi &= \sqrt{D_{AL} \times k_{ov}} \\ \phi^2 &= D_{AL} \times k_{ov} \\ k_{ov} &= \phi^2 / D_{AL} \\ &= (0.0014 \text{ m/det})^2 / 2.3106 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{det} \\ &= 865.3377 \text{ det}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [CO_2]_i &= \frac{k_g P_A + [CO_2]_e \sqrt{D_{AL} k_{ov}}}{k_g H_e + \sqrt{D_{AL} k_{ov}}} \\ &= \frac{(3.2577 \times 10^{-9} \frac{\text{kmol}}{\text{s}} \text{m}^2 \text{Pa})(40530 \text{ Pa}) + (2.3593 \times 10^{-6}) \sqrt{(2.3106 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{det}}) (\frac{865.3377}{\text{det}})}}{(3.2577 \times 10^{-9} \frac{\text{kmol}}{\text{s}} \text{m}^2 \text{Pa}) (3474605.907 \frac{\text{m}^2 \text{Pa}}{\text{kmol}}) + \sqrt{(2.3106 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{det}}) (\frac{865.3377}{\text{det}})}} \\ &= 0.0104 \text{ kmol/m}^3 \end{aligned}$$

### **Menentukan Apparent Reaction Rate Constant ( $k_{app}$ )**

$$\begin{aligned}
 \log_{10} k_{OH^-} &= 13.635 - \frac{2895}{T} \\
 &= 13.635 - \frac{2895}{303.15 \text{ K}} \\
 k_{OH^-} &= 12169.4834 \text{ m}^3/\text{kmol}\cdot\text{det} \\
 k_{MDEA} &= 2,07 \times 10^9 \exp\left(\frac{-5912,7}{T}\right) \text{ (Ko \& Li, 2000)} \\
 &= 2,07 \times 10^9 \exp\left(\frac{-5912,7}{303.15}\right) \\
 &= 7.3633 \text{ m}^3/\text{kmol}\cdot\text{det}
 \end{aligned}$$

Konsentrasi 0.5% berat *arginine* dan 0.5% berat *glycine* dalam 6000 gram (5.78 liter) larutan campuran MDEA dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \text{BM } arginine &= 174.2 \text{ g/mol} \\
 \text{BM } glycine &= 75.067 \text{ g/mol} \\
 \text{Massa } arginine &= 0.5\% \times 6000 \text{ gram} = 30 \text{ gram} \\
 \text{Massa } glycine &= 0.5\% \times 6000 \text{ gram} = 30 \text{ gram} \\
 \text{Molaritas } arginine &= (30 \text{ gram} / 174.2 \text{ g/mol})/5.78 \text{ L} \\
 &= 0.1659 \text{ gmol/L} \approx 0.1659 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} \\
 \text{Molaritas } glycine &= (30 \text{ gram} / 75.067 \text{ g/mol})/5.78 \text{ L} \\
 &= 0.06914 \text{ gmol/L} \approx 0.06914 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 k_{app} &= k_{ov} - k_{OH^-} [OH^-] - k_{MDEA} [MDEA] \\
 &= (865.3377) - \{(12169.4834) \times (0.0002979)\} - \\
 &\quad \{(7.3633) \times (3.4845)\} \\
 &= 836.0553 \text{ det}^{-1}
 \end{aligned}$$

### **Pembuktian Regim Reaksi Cepat Pseudo First Order**

Kondisi reaksi pada absorpsi  $\text{CO}_2$  kedalam larutan MDEA berpromotor umumnya dipilih dalam rezim reaksi cepat *pseudo first order* dengan ketentuan

nilai yaitu  $3 < Ha < \frac{1}{2} Ei$  (Danckwerts, 1970; Lin dan Shyu, 1999) :

$$H_a = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L}$$

$$E_i = \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{C_{B0}}{z [CO_2]_i} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \quad \text{dimana,}$$

$k_{ov}$  = Konstanta laju reaksi overall pseudo first order, ( $\text{det}^{-1}$ )

$D_{AL}$  = Diffusivitas  $\text{CO}_2$  dalam  $\text{H}_2\text{O}$ , ( $\text{m}^2/\text{det}$ )

$D_{BL}$  = Diffusivitas  $\text{CO}_3^{2-}$  dalam  $\text{H}_2\text{O}$ , ( $\text{m}^2/\text{det}$ )

$k_L$  = Koefisien perpindahan massa sisi cairan, ( $\text{kmol}/\text{s.m}^2$ )

$C_{B0}$  = Konsentrasi awal reaktan, ( $\text{kmol}/\text{m}^3$ )

$Z$  = Koefisien mol reaktan yang bereaksi dengan 1 mol gas terlarut

$[CO_2]_i$  = Konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  dalam *interface*, ( $\text{kmol}/\text{m}^3$ )

$$H_a = \frac{\sqrt{k_{ov} D_{AL}}}{k_L}$$

$$= \frac{\sqrt{(865.3377 \text{ det}^{-1})(2.3106 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{det}})}}{(0.0009145 \frac{\text{kmol}}{\text{s.m}^2})}$$

$$= 15.4615$$

$$\frac{1}{2} Ei = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{D_{AL}}{D_{BL}}} + \frac{C_{B0}}{z [CO_2]_i} \sqrt{\frac{D_{BL}}{D_{AL}}} \right\}$$

$$\frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{(2.3106 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{det}})}{(9.5252 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{det}})}} + \frac{(2.56 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3})}{(1)(0.0104 \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3})} \sqrt{\frac{(9.5252 \times 10^{-10} \frac{\text{m}^2}{\text{det}})}{(2.3106 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{det}})}} \right\}$$

$$= 108.6558$$

Karena hasil yang didapat sudah memenuhi ketentuan yang ada  $3 < Ha < \frac{1}{2} Ei$ , maka TERBUKTI bahwa reaksi ini berada pada regim cepat *pseudo first order*.

### Menentukan Persamaan Konstanta Laju Reaksi

$$k_{app} = k_{promotor} [promotor]^n$$

$$k_{app} = k_0 e^{-\frac{E}{RT}} [promotor]^n$$

$$\ln k_{app} = \ln k_0 - \frac{E}{RT} + n \ln [promotor]$$

$$Y = A + m X_1 + n X_2$$

dimana :  $Y = \ln k_{app}$

$$A = \ln k_0$$

$$m = -\frac{E}{R}$$

$$n = \text{orde reaksi}$$

$$X_1 = \frac{1}{T}$$

$$X_2 = \ln [promotor]$$

**Tabel A. 2** Data perhitungan konsentrasi *promotor* dan konstanta laju reaksi *apparent* pada variabel konsentrasi promotor 1% berat

Variabel (Arg : Gly) (%)	<u>[Arginine X<sub>1</sub>] [Glycine X<sub>2</sub>] (kmol/m<sup>3</sup>)</u>	T (K)	1/T (K)	Kapp (y)	ln kapp
1:1	[0.1659] : [0.0691]	303.15	0.00329	836.0554	6.728
		313.15	0.00319	1124.187	7.024
		323.15	0.00309	4024.209	8.300
1:2	[0.0199] : [0.0924]	303.15	0.00329	1752.934	7.469
		313.15	0.00319	3386.377	8.127
		323.15	0.00309	5117.348	8.540
2:1	[0.0396] : [0.0459]	303.15	0.00329	1660.339	7.414
		313.15	0.00319	6223.555	8.736
		323.15	0.00309	20253.91	9.916
0:1	[ 0 ] : [0.1377]	303.15	0.00329	1397.030	7.242
		313.15	0.00319	2891.022	7.969

		323.15	0.00309	5899.137	8.682
1:0	[0.0597] : [ 0 ]	303.15	0.00329	1706.401	7.442
		313.15	0.00319	3722.040	8.222
		323.15	0.00309	9079.885	9.113

**Tabel A. 3** Data perhitungan konsentrasi *promotor* dan konstanta laju reaksi *apparent* pada variabel konsentrasi promotor 5% berat

Variabel (Arg : Gly) (%)	[ <u>Arginine</u> $X_1$ ] [Glycine $X_2$ ] ( <b>kmol/m<sup>3</sup></b> )	T (K)	1/T (K)	Kapp (y)	ln kapp
1:1	[0.1524] : [0.3537]	303.15	0.00329	3370.162	8.1227
		313.15	0.00319	19684.95	9.8876
		323.15	0.00309	35257.17	10.470
1:2	[0.1017] : [0.4718]	303.15	0.00329	4509.067	8.4138
		313.15	0.00319	6773.549	8.8208
		323.15	0.00309	10518.35	9.2609
2:1	[0.2023] : [0.2348]	303.15	0.00329	5662.089	8.6415
		313.15	0.00319	15660.74	9.6589
		323.15	0.00309	16568.20	9.7152
0:1	[ 0 ] : [0.6748]	303.15	0.00329	2569.293	7.8514
		313.15	0.00319	5552.284	8.6220
		323.15	0.00309	17435.37	9.7663
1:0	[0.3011] : [ 0 ]	303.15	0.00329	15609.21	9.6557
		313.15	0.00319	39422.02	10.582
		323.15	0.00309	59639.86	10.996

$$y = b_1x_1 + b_2x_2$$

$$\sum yx_1 = b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1x_2$$

$$\sum yx_2 = b_1 \sum x_1x_2 + b_2 \sum x_2^2$$

Nilai Y, X<sub>1</sub>, dan X<sub>2</sub> yang didapatkan dari data pada **Tabel A.2** kemudian dengan menggunakan persamaan di atas didapatkan rumus kapp prediksi pada suhu 303.15 K sebagai berikut:

D	7660.792	b	0.198235	b	0.164496	0.892536
a	907	= 1	149	+ 2	361	x 783
r	8034.108	b	0.164496	b	0.892536	0.164496
i	969	= 1	361	+ 2	783	x 361
jadi,						
h	6837.539	b	0.176932	b	0.146819	
a	456	= 1	163	+ 2	053	
s	1321.581	b	0.027059	b	0.146819	
i	692	= 1	053	+ 2	053	
l	5515.957	b	0.149873			
	764	= 1	11			
p	b1	=	36804.18573			
e						
r	b2	=	2218.344805			

Berdasarkan perhitungan diatas, didapatkan persamaan kapp prediksi untuk suhu 303.15K sebagai berikut  
**Kapp<sub>303.15K</sub> = 38084.19 x<sub>1</sub> + 2218.24 x<sub>2</sub>**

Dengan cara yang sama, didapatkan persamaan kapp prediksi pada suhu 313.15 K dan 323.15 K sebagai berikut:

$$\mathbf{Kapp_{313.15K} = 95361.95 x_1 + 3326.74 x_2}$$

$$K_{app_{323,15K}} = 138822.37 x_1 + 14280.41 x_2$$

Nilai Y, X<sub>1</sub>, dan X<sub>2</sub> didapatkan dari data pada **Tabel A.2** dan **Tabel A.3** , kemudian dengan menggunakan program aplikasi *Analisis Toolpak –VBA* pada *Microsoft Excel* didapatkan:

- $A = \ln k_0$   
 $\ln k_0 = 32.1418$   
 $k_0 = 9.1 \times 10^{13}$
- $m = -\frac{E}{R} = -6530.5392$
- $n = 2$

Sehingga, didapatkan persamaan  $k_{\text{arginine}}$  campuran sebagai berikut :

$$k_{\text{arginine campuran}}(\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{det}) = 9.1 \times 10^{13} e^{-\frac{6530.5392}{T}}$$

Dengan cara yang sama, diperoleh persamaan lain sebagai berikut:

$$k_{\text{glycinecampuran}}(\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{det}) = 5.71 \times 10^6 e^{-\frac{2365.2286}{T}}$$

$$k_{\text{arginine murni}}(\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{det}) = 1.86 \times 10^6 e^{-\frac{764.553}{T}}$$

$$k_{\text{glycine murni}}(\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{det}) = 2.35 \times 10^{21} e^{-\frac{12453.1}{T}}$$



## APPENDIKS B

### B.1 Hasil Analisa Menggunakan CO<sub>2</sub>–Analysis Method

**Tabel B. 1** Data Perhitungan [CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>] dan [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 1:1

T(K)	Molar NaOH	Vol NaOH Sampel Awal	Vol NaOH Sampel Akhir	[CO <sub>2</sub> ] awal	[CO <sub>2</sub> ] akhir	[CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] akhir	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] akhir
	(M)	(ml)	(ml)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)
303.15	0.05	14.3	11.05	0.0293	0.0460	0.0236	0.0224
313.15	0.05	14.3	11	0.0293	0.0462	0.0263	0.0200
323.15	0.05	14.3	9.3	0.0293	0.0550	0.0217	0.0333

**Tabel B. 2** Data Perhitungan [CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>] dan [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 1:2

T(K)	Molar NaOH	Vol NaOH Sampel Awal	Vol NaOH Sampel Akhir	[CO <sub>2</sub> ] awal	[CO <sub>2</sub> ] akhir	[CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ] akhir	[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] akhir
	(M)	(ml)	(ml)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)
303.15	0.05	16.6	12.15	0.0175	0.0403	0.0220	0.0183
313.15	0.05	16.6	11.4	0.0175	0.0442	0.0202	0.0240
323.15	0.05	16.6	11.1	0.0175	0.0457	0.0171	0.0287

**Tabel B. 3** Data Perhitungan  $[\text{CO}_3^{2-}]$  dan  $[\text{HCO}_3^-]$  pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 2:1

T(K)	Molar NaOH	Vol NaOH Sampel Awal	Vol NaOH Sampel Akhir	$[\text{CO}_2]$ awal	$[\text{CO}_2]$ akhir	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir
	(M)	(ml)	(ml)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)
303.15	0.05	16.3	11.95	0.0190	0.0414	0.0223	0.0191
313.15	0.05	16.3	9.7	0.0190	0.0529	0.0218	0.0311
323.15	0.05	16.3	7.2	0.0190	0.0658	0.0192	0.0466

**Tabel B. 4** Data Perhitungan  $[\text{CO}_3^{2-}]$  dan  $[\text{HCO}_3^-]$  pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 1:0

T(K)	Molar NaOH	Vol NaOH Sampel Awal	Vol NaOH Sampel Akhir	$[\text{CO}_2]$ awal	$[\text{CO}_2]$ akhir	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir
	(M)	(ml)	(ml)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)
303.15	0.05	15	11.1	0.0267	0.0475	0.03125	0.0162
313.15	0.05	15	10.3	0.0267	0.0517	0.02674	0.0250
323.15	0.05	15	9.4	0.0267	0.0565	0.02156	0.0350

**Tabel B. 5** Data Perhitungan  $[\text{CO}_3^{2-}]$  dan  $[\text{HCO}_3^-]$  pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 0:1

T(K)	Molar NaOH	Vol NaOH Sampel Awal	Vol NaOH Sampel Akhir	$[\text{CO}_2]$ awal	$[\text{CO}_2]$ akhir	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir
	(M)	(ml)	(ml)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)
303.15	0.05	16.1	11.7	0.0200	0.0426	0.0227	0.0200
313.15	0.05	16.1	10.7	0.0200	0.0478	0.0209	0.0269
323.15	0.05	16.1	9.25	0.0200	0.0552	0.0182	0.0370

**Tabel B. 6** Data Perhitungan  $[\text{CO}_3^{2-}]$  dan  $[\text{HCO}_3^-]$  pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 1:1

T(K)	Molar NaOH	Vol NaOH Sampel Awal	Vol NaOH Sampel Akhir	$[\text{CO}_2]$ awal	$[\text{CO}_2]$ akhir	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir
	(M)	(ml)	(ml)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)
303.15	0.05	15.3	9.5	0.0755	0.1053	0.0337	0.0717
313.15	0.05	15.3	5.4	0.0755	0.1264	0.0329	0.0935
323.15	0.05	15.3	4.5	0.0755	0.1310	0.0251	0.1059

**Tabel B. 7** Data Perhitungan  $[\text{CO}_3^{2-}]$  dan  $[\text{HCO}_3^-]$  pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 1:2

T(K)	Molar NaOH	Vol NaOH Sampel Awal	Vol NaOH Sampel Akhir	$[\text{CO}_2]$ awal	$[\text{CO}_2]$ akhir	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir
	(M)	(ml)	(ml)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)
303.15	0.05	16.7	10.2	0.0683	0.1017	0.0300	0.0717
313.15	0.05	16.7	9.9	0.0683	0.1033	0.0277	0.0755
323.15	0.05	16.7	9.5	0.0683	0.1053	0.0220	0.0833

**Tabel B. 8** Data Perhitungan  $[\text{CO}_3^{2-}]$  dan  $[\text{HCO}_3^-]$  pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 2:1

T(K)	Molar NaOH	Vol NaOH Sampel Awal	Vol NaOH Sampel Akhir	$[\text{CO}_2]$ awal	$[\text{CO}_2]$ akhir	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir
	(M)	(ml)	(ml)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)
303.15	0.05	15.9	8.8	0.0211	0.0575	0.0265	0.0310
313.15	0.05	15.9	6.7	0.0211	0.0683	0.0243	0.0440
323.15	0.05	15.9	7.4	0.0211	0.0647	0.0194	0.0453

**Tabel B. 9** Data Perhitungan  $[\text{CO}_3^{2-}]$  dan  $[\text{HCO}_3^-]$  pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 1:0

T(K)	Molar NaOH	Vol NaOH Sampel Awal	Vol NaOH Sampel Akhir	$[\text{CO}_2]$ awal	$[\text{CO}_2]$ akhir	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir
	(M)	(ml)	(ml)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)
303.15	0.05	15.2	5.35	0.0254	0.0775	0.0293	0.0482
313.15	0.05	15.2	3.3	0.0254	0.0884	0.0257	0.0627
323.15	0.05	15.2	2.95	0.0254	0.0902	0.0205	0.0697

**Tabel B. 10** Data Perhitungan  $[\text{CO}_3^{2-}]$  dan  $[\text{HCO}_3^-]$  pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 0:1

T(K)	Molar NaOH	Vol NaOH Sampel Awal	Vol NaOH Sampel Akhir	$[\text{CO}_2]$ awal	$[\text{CO}_2]$ akhir	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir
	(M)	(ml)	(ml)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)
303.15	0.05	15.9	10.7	0.0724	0.0991	0.0320	0.0672
313.15	0.05	15.9	9.6	0.0724	0.1048	0.0269	0.0779
323.15	0.05	15.9	7.3	0.0724	0.1166	0.0216	0.0950

**Tabel B. 11** Data Perhitungan  $[\text{CO}_3^{2-}]$  dan  $[\text{HCO}_3^-]$  pada MDEA 40% berat

T(K)	Molar NaOH	Vol NaOH Sampel Awal	Vol NaOH Sampel Akhir	$[\text{CO}_2]$ awal	$[\text{CO}_2]$ akhir	$[\text{CO}_3^{2-}]$ akhir	$[\text{HCO}_3^-]$ akhir
	(M)	(ml)	(ml)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)	(mol/L)
303.15	0.05	16	12.9	0.0217	0.0386	0.0210	0.0176
313.15	0.05	16	12.6	0.0217	0.0402	0.0188	0.0215
323.15	0.05	16	10.4	0.0217	0.0522	0.0173	0.0349

**B.2 Hasil Perhitungan [OH<sup>-</sup>] dan [CO<sub>2</sub><sup>-</sup>]**

**Tabel B. 12** Data Perhitungan [OH<sup>-</sup>] dan [CO<sub>2</sub><sup>-</sup>] pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 1:1

T (K)	K <sub>w</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	[OH] -	[CO <sub>2</sub> <sup>-</sup> je
303. 15	1.45E -14	4.63E -07	5.13E -11	1.25E +02	2.70E +08	0.00 030	2.36E -06
313. 15	2.89E -14	5.02E -07	6.01E -11	8.89E +01	1.77E +08	0.00 063	1.82E -06
323. 15	5.38E -14	5.22E -07	6.73E -11	6.05E +01	1.16E +08	0.00 052	6.60E -06

**Tabel B. 13** Data Perhitungan [OH<sup>-</sup>] dan [CO<sub>2</sub><sup>-</sup>] pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 1:2

T (K)	K <sub>w</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	[OH] -	[CO <sub>2</sub> <sup>-</sup> je
303. 15	1.45E -14	4.63E -07	5.13E -11	1.25E +02	2.70E +08	0.00 034	1.69E -06
313. 15	2.89E -14	5.02E -07	6.01E -11	8.89E +01	1.77E +08	0.00 040	3.42E -06
323. 15	5.38E -14	5.22E -07	6.73E -11	6.05E +01	1.16E +08	0.00 048	6.21E -06

**Tabel B. 14** Data Perhitungan [OH<sup>-</sup>] dan [CO<sub>2</sub><sup>-</sup>] pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 2:1

T (K)	K <sub>w</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	[OH] -	[CO <sub>2</sub> <sup>-</sup> je
303. 15	1.45E -14	4.63E -07	5.13E -11	1.25E +02	2.70E +08	0.00 033	1.81E -06

<b>313.</b>	2.89E	5.02E	6.01E	8.89E	1.77E	0.00	5.34E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+01	+08	034	-06
<b>323.</b>	5.38E	5.22E	6.73E	6.05E	1.16E	0.00	1.46E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+01	+08	033	-05

**Tabel B. 15** Data Perhitungan  $[\text{OH}^-]$  dan  $[\text{CO}_2^-]$  pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:0

<b>T (K)</b>	<b>K<sub>w</sub></b>	<b>K<sub>1</sub></b>	<b>K<sub>2</sub></b>	<b>K<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>4</sub></b>	<b>[OH] -</b>	<b>[CO<sub>2</sub><sup>-</sup> ]e</b>
<b>303.</b>	1.45E	4.63E	5.13E	1.25E	2.70E	0.00	9.32E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+02	+08	055	-07
<b>313.</b>	2.89E	5.02E	6.01E	8.89E	1.77E	0.00	2.80E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+01	+08	051	-06
<b>323.</b>	5.38E	5.22E	6.73E	6.05E	1.16E	0.00	7.31E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+01	+08	049	-06

**Tabel B. 16** Data Perhitungan  $[\text{OH}^-]$  dan  $[\text{CO}_2^-]$  pada konsentrasi 1% berat dengan komposisi promotor *Arginine* dan *Glycine* 0:1

<b>T (K)</b>	<b>K<sub>w</sub></b>	<b>K<sub>1</sub></b>	<b>K<sub>2</sub></b>	<b>K<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>4</sub></b>	<b>[OH] -</b>	<b>[CO<sub>2</sub><sup>-</sup> ]e</b>
<b>303.</b>	1.45E	4.63E	5.13E	1.25E	2.70E	0.00	1.94E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+02	+08	032	-06
<b>313.</b>	2.89E	5.02E	6.01E	8.89E	1.77E	0.00	4.14E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+01	+08	037	-06
<b>323.</b>	5.38E	5.22E	6.73E	6.05E	1.16E	0.00	9.67E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+01	+08	039	-06

**Tabel B. 17** Data Perhitungan  $[\text{OH}^-]$  dan  $[\text{CO}_2^-]$  pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 1:1

T (K)	$K_w$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$[\text{OH}^-]$	$[\text{CO}_2^-]$
<b>303. 15</b>	1.45E -14	4.63E -07	5.13E -11	1.25E +02	2.70E +08	0.00 013	1.69E -05
<b>313. 15</b>	2.89E -14	5.02E -07	6.01E -11	8.89E +01	1.77E +08	0.00 017	3.18E -05
<b>323. 15</b>	5.38E -14	5.22E -07	6.73E -11	6.05E +01	1.16E +08	0.00 019	5.76E -05

**Tabel B. 18** Data Perhitungan  $[\text{OH}^-]$  dan  $[\text{CO}_2^-]$  pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 1:2

T (K)	$K_w$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$[\text{OH}^-]$	$[\text{CO}_2^-]$
<b>303. 15</b>	1.45E -14	4.63E -07	5.13E -11	1.25E +02	2.70E +08	0.00 012	1.90E -05
<b>313. 15</b>	2.89E -14	5.02E -07	6.01E -11	8.89E +01	1.77E +08	0.00 018	2.46E -05
<b>323. 15</b>	5.38E -14	5.22E -07	6.73E -11	6.05E +01	1.16E +08	0.00 021	4.07E -05

**Tabel B. 19** Data Perhitungan  $[\text{OH}^-]$  dan  $[\text{CO}_2^-]$  pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 2:1

T (K)	$K_w$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$[\text{OH}^-]$	$[\text{CO}_2^-]$
<b>303. 15</b>	1.45E -14	4.63E -07	5.13E -11	1.25E +02	2.70E +08	0.00 024	4.01E -06
<b>313. 15</b>	2.89E -14	5.02E -07	6.01E -11	8.89E +01	1.77E +08	0.00 027	9.53E -06

<b>323.</b>	5.38E	5.22E	6.73E	6.05E	1.16E	0.00	1.37E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+01	+08	034	-05

**Tabel B. 20** Data Perhitungan  $[\text{OH}^-]$  dan  $[\text{CO}_2^-]$  pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 1:0

<b>T (K)</b>	<b>K<sub>w</sub></b>	<b>K<sub>1</sub></b>	<b>K<sub>2</sub></b>	<b>K<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>4</sub></b>	<b>[OH] -</b>	<b>[CO<sub>2</sub><sup>-</sup> ]e</b>
<b>303.</b>	1.45E	4.63E	5.13E	1.25E	2.70E	0.00	8.76E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+02	+08	017	-06
<b>313.</b>	2.89E	5.02E	6.01E	8.89E	1.77E	0.00	1.83E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+01	+08	020	-05
<b>323.</b>	5.38E	5.22E	6.73E	6.05E	1.16E	0.00	3.06E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+01	+08	024	-05

**Tabel B. 21** Data Perhitungan  $[\text{OH}^-]$  dan  $[\text{CO}_2^-]$  pada konsentrasi 5% berat dengan komposisi promotor *Arginine dan Glycine* 0:1

<b>T (K)</b>	<b>K<sub>w</sub></b>	<b>K<sub>1</sub></b>	<b>K<sub>2</sub></b>	<b>K<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>4</sub></b>	<b>[OH] -</b>	<b>[CO<sub>2</sub><sup>-</sup> ]e</b>
<b>303.</b>	1.45E	4.63E	5.13E	1.25E	2.70E	0.00	1.56E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+02	+08	013	-05
<b>313.</b>	2.89E	5.02E	6.01E	8.89E	1.77E	0.00	2.70E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+01	+08	017	-05
<b>323.</b>	5.38E	5.22E	6.73E	6.05E	1.16E	0.00	5.39E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+01	+08	018	-05

**Tabel B. 22** Data Perhitungan  $[\text{OH}^-]$  dan  $[\text{CO}_2^-]$  pada MDEA 40% berat

<b>T (K)</b>	<b>K<sub>w</sub></b>	<b>K<sub>1</sub></b>	<b>K<sub>2</sub></b>	<b>K<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>4</sub></b>	<b>[OH] -</b>	<b>[CO<sub>2</sub><sup>-</sup> ]e</b>
------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	-------------------	---



<b>303.</b>	1.45E	4.63E	5.13E	1.25E	2.70E	0.00	1.64E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+02	+08	034	-06
<b>313.</b>	2.89E	5.02E	6.01E	8.89E	1.77E	0.00	2.94E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+01	+08	042	-06
<b>323.</b>	5.38E	5.22E	6.73E	6.05E	1.16E	0.00	9.11E
<b>15</b>	-14	-07	-11	+01	+08	040	-06

### B.3 Nilai Kontanta Henry

**Tabel B. 23** Data Perhitungan Konstanta Henry berbagai variabel pada temperatur 303.15 K – 323.15 K

<b>T (K)</b>	<b>(d ln kh/- d(1/ T) {X}</b>	<b>((1/T)- (1/298) ) {Y}</b>	<b>EXP({X}·{ Y})</b>	<b>1/He<sup>t</sup> (kmol/m3. pa)</b>	<b>He<sup>t</sup> (m3.pa/k mol)</b>
<b>303. 15</b>	2400	-5.70E- 05	0.8721	2.88E-07	3474605.9 1
<b>313. 15</b>	2400	-1.62E- 04	0.6773	2.24E-07	4474054.9 4
<b>323. 15</b>	2400	-2.61E- 04	0.5343	1.76E-07	5671549.5 1

### B.4 Hasil Perhitungan Diffusivitas

**Tabel B. 24** Data Perhitungan Diffusivitas Berbagai Variabel pada Temperatur 303.15 K – 323.15 K

<b>T (K)</b>	<b>DA<sub>L</sub> (m<sup>2</sup>/det)</b>	<b>DA<sub>g</sub> (m<sup>2</sup>/det)</b>	<b>DB<sub>L</sub> (m<sup>2</sup>/det)</b>
<b>303.15</b>	2.31E-09	1.72E-05	9.53E-10

<b>313.15</b>	2.91E-09	1.82E-05	1.20E-09
<b>323.15</b>	3.59E-09	1.92E-05	1.48E-09
<b>333.15</b>	4.34E-09	2.03E-05	1.79E-09

## B.5 Hasil Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa

**Tabel B. 25** Data Perhitungan Koefisien Perpindahan Massa Gas Berbagai Variabel pada Temperatur 303.15 K – 323.15 K

<b>T (K)</b>	<b>Sc</b>	<b>Re</b>	<b>Sh</b>	<b>Kg (kmol/s.m<sup>2</sup>.Pa)</b>
<b>303.15</b>	0.7950	716.94	44.41	3.26E-09
<b>313.15</b>	0.7992	673.73	42.32	3.18E-09
<b>323.15</b>	0.8031	634.61	40.39	3.11E-09
<b>333.15</b>	0.8066	599.06	38.60	3.04E-09

**Tabel B. 26** Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid pada Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:1

<b>T (K)</b>	<b>δ (m)</b>	<b>V max (m/s)</b>	<b>kl (m/s)</b>
<b>303.15</b>	4.64E-04	0.2643	9.15E-05
<b>313.15</b>	4.58E-04	0.2676	1.03E-04
<b>323.15</b>	4.52E-04	0.2712	1.15E-04

**Tabel B. 27** Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid pada Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:2

T (K)	$\delta$ (m)	V max (m/s)	kl (m/s)
303.15	4.96E-04	0.2471	8.84E-05
313.15	4.87E-04	0.2513	1.00E-04
323.15	4.72E-04	0.2595	1.13E-04

**Tabel B. 28** Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid pada Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 2:1

T (K)	$\delta$ (m)	V max (m/s)	kl (m/s)
303.15	4.67E-04	0.2622	9.11E-05
313.15	4.61E-04	0.2655	1.03E-04
323.15	4.43E-04	0.2763	1.17E-04

**Tabel B. 29** Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid pada Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:0

T (K)	$\delta$ (m)	V max (m/s)	kl (m/s)
303.15	5.01E-04	0.2443	8.79E-05
313.15	4.90E-04	0.2500	9.99E-05
323.15	4.87E-04	0.2516	1.11E-04

**Tabel B. 30** Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid pada Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 0:1

T (K)	$\delta$ (m)	V max (m/s)	kl (m/s)
303.15	4.74E-04	0.2584	9.04E-05
313.15	4.52E-04	0.2707	1.04E-04
323.15	4.45E-04	0.2754	1.16E-04

**Tabel B. 31** Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid pada Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:1

T (K)	$\delta$ (m)	V max (m/s)	kl (m/s)
303.15	5.23E-04	0.2342	8.61E-05
313.15	5.05E-04	0.2426	9.84E-05
323.15	5.04E-04	0.2429	1.09E-04

**Tabel B. 32** Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid pada Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:2

T (K)	$\delta$ (m)	V max (m/s)	kl (m/s)
303.15	5.16E-04	0.2375	8.67E-05
313.15	4.99E-04	0.2452	9.89E-05
323.15	4.89E-04	0.2506	1.11E-04

**Tabel B. 33** Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid pada Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 2:1

T (K)	$\delta$ (m)	V max (m/s)	kl (m/s)
303.15	4.93E-04	0.2487	8.87E-05
313.15	4.76E-04	0.2573	1.01E-04
323.15	4.66E-04	0.2630	1.14E-04

**Tabel B. 34** Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid pada Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:0

T (K)	$\delta$ (m)	V max (m/s)	kl (m/s)
303.15	4.87E-04	0.2513	8.92E-05
313.15	4.67E-04	0.2622	1.02E-04
323.15	4.60E-04	0.2663	1.14E-04

**Tabel B. 35** Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid pada Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 0:1

T (K)	$\delta$ (m)	V max (m/s)	kl (m/s)
303.15	5.15E-04	0.2378	8.68E-05
313.15	5.12E-04	0.2394	9.78E-05
323.15	5.12E-04	0.2394	1.09E-04

**Tabel B. 36** Data Perhitungan Perpindahan Massa Liquid pada MDEA 40% berat

T (K)	$\delta$ (m)	V max (m/s)	kl (m/s)
303.15	5.40E-04	0.2268	8.47E-05
313.15	5.24E-04	0.2339	9.66E-05
323.15	5.18E-04	0.2365	1.08E-04

**B.6 Hasil Perhitungan  $\phi$  (m/s) dan  $k_{ov}$  (1/s)**

**Tabel B. 37** Data Perhitungan  $\phi$  (m/s) dan  $k_{ov}$  (1/s) pada Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:1

T (K)	$\phi$ (m/s)	$k_{ov}$ (1/s)
303.15	1.41E-03	865.34
313.15	1.86E-03	1185.02
323.15	3.85E-03	4126.18

**Tabel B. 38** Data Perhitungan  $\phi$  (m/s) dan  $k_{ov}$  (1/s) pada Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:2

T (K)	$\phi$ (m/s)	$k_{ov}$ (1/s)
303.15	2.03E-03	1782.78
313.15	3.17E-03	3441.70
323.15	4.33E-03	5217.35

**Tabel B. 39** Data Perhitungan  $\phi$  (m/s) dan  $k_{ov}$  (1/s) pada Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 2:1

T (K)	$\phi$ (m/s)	$k_{ov}$ (1/s)
<b>303.15</b>	1.98E-03	1689.95
<b>313.15</b>	4.28E-03	6277.00
<b>323.15</b>	8.55E-03	20346.62

**Tabel B. 40** Data Perhitungan  $\phi$  (m/s) dan  $k_{ov}$  (1/s) pada Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:0

T (K)	$\phi$ (m/s)	$k_{ov}$ (1/s)
<b>303.15</b>	1.82E-03	1429.23
<b>313.15</b>	2.93E-03	2948.79
<b>323.15</b>	4.64E-03	5999.50

**Tabel B. 41** Data Perhitungan  $\phi$  (m/s) dan  $k_{ov}$  (1/s) pada Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 0:1

T (K)	$\phi$ (m/s)	$k_{ov}$ (1/s)
<b>303.15</b>	2.00E-03	1736.03
<b>313.15</b>	3.32E-03	3776.63
<b>323.15</b>	5.74E-03	9176.02

**Tabel B. 42** Data Perhitungan  $\phi$  (m/s) dan  $k_{ov}$  (1/s) pada Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:1

T (K)	$\phi$ (m/s)	$k_{ov}$ (1/s)
303.15	2.80E-03	3398.03
313.15	7.58E-03	19735.47
323.15	1.13E-02	35345.22

**Tabel B. 43** Data Perhitungan  $\phi$  (m/s) dan  $k_{ov}$  (1/s) pada Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:2

T (K)	$\phi$ (m/s)	$k_{ov}$ (1/s)
303.15	3.24E-03	4536.77
313.15	4.46E-03	6824.27
323.15	6.17E-03	10607.46

**Tabel B. 44** Data Perhitungan  $\phi$  (m/s) dan  $k_{ov}$  (1/s) pada Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 2:1

T (K)	$\phi$ (m/s)	$k_{ov}$ (1/s)
303.15	3.63E-03	5691.18
313.15	6.77E-03	15713.43
323.15	7.73E-03	16663.14



**Tabel B. 45** Data Perhitungan  $\phi$  (m/s) dan  $k_{ov}$  (1/s) pada Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:0

<b>T (K)</b>	<b><math>\phi</math> (m/s)</b>	<b><math>k_{ov}</math> (1/s)</b>
<b>303.15</b>	6.01E-03	15636.92
<b>313.15</b>	1.07E-02	39471.08
<b>323.15</b>	1.46E-02	59726.43

**Tabel B. 46** Data Perhitungan  $\phi$  (m/s) dan  $k_{ov}$  (1/s) pada Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 0:1

<b>T (K)</b>	<b><math>\phi</math> (m/s)</b>	<b><math>k_{ov}</math> (1/s)</b>
<b>303.15</b>	2.45E-03	2595.97
<b>313.15</b>	4.04E-03	5600.59
<b>323.15</b>	7.93E-03	17519.41

**Tabel B. 47** Data Perhitungan  $\phi$  (m/s) dan  $k_{ov}$  (1/s) pada Konsentrasi MDEA 40% Berat

<b>T (K)</b>	<b><math>\phi</math> (m/s)</b>	<b><math>k_{ov}</math> (1/s)</b>
<b>303.15</b>	1.43E-03	883.13
<b>313.15</b>	2.05E-03	1442.10
<b>323.15</b>	4.75E-03	6296.81

**B.7 Hasil Perhitungan  $k_{\text{MDEA}}$ ,  $k_{[\text{OH}^-]}$  dan  $k_{\text{app}}$**

**Tabel B. 48** Data Perhitungan  $k_{\text{MDEA}}$  dan  $k_{[\text{OH}^-]}$

T (K)	$k_{\text{MDEA}}$	$k_{\text{OH}^-}$
303.15	7.3633	12169.4834
313.15	13.0051	24560.0430
323.15	22.1750	47458.2898
333.15	36.6186	88149.6559

**Tabel B. 49** Data Perhitungan  $k_{\text{apparence}}$  pada Konsentrasi 1% Berat Promotor pada Temperatur 303.15 – 333.15 K

T (K)	$k_{\text{apparence}}$				
	1:1	1:2	2:1	1:0	0:1
303.15	836.06	1752.93	1660.34	1706.40	1397.03
313.15	1124.19	3386.38	6223.56	3722.04	2891.02
323.15	4024.21	5117.35	20253.91	9079.89	5899.14
333.15	3573.88	8174.55	26022.51	2796.58	5897.04

**Tabel B. 50** Data Perhitungan  $k_{\text{apparence}}$  pada Konsentrasi 5% Berat Promotor pada Temperatur 303.15 – 333.15 K

T (K)	$k_{\text{apparence}}$				
	1:1	1:2	2:1	1:0	0:1
303.15	3370.16	4509.07	5662.09	15609.7 8	2569.29
313.15	19684.9 6	6773.55	15660.7 4	39422.0 2	5552.28

<b>323.15</b>	35257.1 8	10518.3 5	16568.2 1	59639.8 6	17435.3 7
---------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

## B.8 Hasil Perhitungan Rezim

**Tabel B. 51** Data Perhitungan Resim Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:1

<b>T (K)</b>	<b>Ha</b>	<b>Cai (kmol/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Ei</b>	<b>0,5Ei</b>
<b>303.15</b>	15.4615	0.0104	217.3116	108.6558
<b>313.15</b>	17.9795	0.0080	280.7662	140.3831
<b>323.15</b>	33.3301	0.0059	382.9111	191.4556

**Tabel B. 52** Data Perhitungan Resim Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:2

<b>T (K)</b>	<b>Ha</b>	<b>Cai (kmol/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Ei</b>	<b>0,5Ei</b>
<b>303.15</b>	22.9506	0.0099	228.1378	114.0689
<b>313.15</b>	31.6201	0.0074	303.9847	151.9924
<b>323.15</b>	38.3104	0.0057	392.0962	196.0481

**Tabel B. 53** Data Perhitungan Resim Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 2:1

<b>T (K)</b>	<b>Ha</b>	<b>Cai (kmol/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Ei</b>	<b>0,5Ei</b>
<b>303.15</b>	21.6901	0.0099	226.2362	113.1181
<b>313.15</b>	41.5450	0.0070	321.8328	160.9164
<b>323.15</b>	73.3150	0.0048	464.7347	232.3674

**Tabel B. 54** Data Perhitungan Resim Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:0

T (K)	Ha	Cai (kmol/m <sup>3</sup> )	Ei	0,5Ei
303.15	20.6649	0.0101	223.2609	111.6305
313.15	29.3459	0.0075	298.1905	149.0953
323.15	41.7200	0.0057	395.3777	197.6889

**Tabel B. 55** Data Perhitungan Resim Konsentrasi 1% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 0:1

T (K)	Ha	Cai (kmol/m <sup>3</sup> )	Ei	0,5Ei
303.15	22.1473	0.0099	227.7432	113.8716
313.15	31.9137	0.0073	306.6762	153.3381
323.15	49.3221	0.0054	417.2248	208.6124

**Tabel B. 56** Data Perhitungan Resim Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:1

T (K)	Ha	Cai (kmol/m <sup>3</sup> )	Ei	0,5Ei
303.15	32.5482	0.0094	246.2580	123.1290
313.15	77.0699	0.0059	388.1156	194.0578
323.15	103.0779	0.0044	523.8237	261.9119

**Tabel B. 57** Data Perhitungan Resim Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:2

<b>T (K)</b>	<b>Ha</b>	<b>Cai (kmol/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Ei</b>	<b>0,5Ei</b>
<b>303.15</b>	37.3401	0.0091	253.9105	126.9552
<b>313.15</b>	45.0720	0.0069	333.2676	166.6338
<b>323.15</b>	55.5852	0.0053	433.3281	216.6641

**Tabel B. 58** Data Perhitungan Resim Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 2:1

<b>T (K)</b>	<b>Ha</b>	<b>Cai (kmol/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Ei</b>	<b>0,5Ei</b>
<b>303.15</b>	40.8750	0.0088	259.4896	129.7448
<b>313.15</b>	66.7752	0.0061	372.5487	186.2743
<b>323.15</b>	68.0051	0.0050	460.0026	230.0013

**Tabel B. 59** Data Perhitungan Resim Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 1:0

<b>T (K)</b>	<b>Ha</b>	<b>Cai (kmol/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Ei</b>	<b>0,5Ei</b>
<b>303.15</b>	67.3989	0.0076	288.0252	144.0126
<b>313.15</b>	104.8247	0.0052	423.5626	211.7813
<b>323.15</b>	127.9500	0.0039	558.9274	279.4637

**Tabel B. 60** Data Perhitungan Resim Konsentrasi 5% Berat dengan Komposisi Promotor *Arginine* dan *Glycine* 0:1

<b>T (K)</b>	<b>Ha</b>	<b>Cai (kmol/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Ei</b>	<b>0,5Ei</b>
<b>303.15</b>	28.2298	0.0096	229.1743	114.5872
<b>313.15</b>	41.3225	0.0071	310.7351	155.3675
<b>323.15</b>	73.0853	0.0049	443.0616	221.5308

**Tabel B. 61** Data Perhitungan Resim MDEA 40% Berat

<b>T (K)</b>	<b>Ha</b>	<b>Cai (kmol/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Ei</b>	<b>0,5Ei</b>
<b>303.15</b>	16.8595	0.0104	206.4361	103.2181
<b>313.15</b>	21.2151	0.0079	269.5388	134.7694
<b>323.15</b>	44.0894	0.0056	378.4771	189.2385

## RIWAYAT HIDUP PENULIS



**Ali Sahab Amrin** lahir pada Januari 1994 di kota Indramayu, Jawa barat. Penulis menempuh pendidikan S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, Fakultas Teknologi Industri, Program Studi Departemen Teknik Kimia, sampai terselesaikannya buku ini. Semasa kuliah penulis aktif mengikuti

kegiatan organisasi di Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) ITS. Penulis menjalani kerja praktik di PT Badak LNG Bontang. Pada tahun terakhirnya, penulis memilih Laboratorium Teknologi Biokimia Teknik Kimia untuk pengerjaan Tugas Akhir studinya. Penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir Pra-Desain Pabrik berjudul “Sodium Lignosulfonat (Na-LS) dari *Black Liquor*” dan Tugas Akhir penelitian yang berjudul “Studi Kinetika Reaksi Penyerapan Gas CO<sub>2</sub> dalam Biogas Menggunakan MDEA Berpromotor Campuran Asam Amino” di bawah bimbingan Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M.Eng. Penulis terbuka terhadap kritik dan saran yang membangun mengenai penelitian ini dan pembaca dapat menghubungi penulis melalui informasi di bawah ini.

### Data Penulis

Nama	: Ali Sahab Amrin
Alamat	: Blok Komplek RT/RW 12/01, Kedokanbunder, Indramayu
Email	: alisahabamrin@gmail.com

## RIWAYAT HIDUP PENULIS



**Audria Aliza Setio Utari** lahir pada tanggal 3 Agustus 1995 di kota Balikpapan, Kalimantan Timur. Penulis menempuh pendidikan S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, Fakultas Teknologi Industri, Program Studi Departemen Teknik Kimia, sampai terselesaikannya buku ini. Semasa kuliah penulis aktif mengikuti kegiatan organisasi di *Society of Petroleum*

*Engineers* (SPE) ITS. Penulis menjalani kerja praktik di TOTAL E&P Balikpapan, pada divisi *Well Intervention*. Pada tahun terakhirnya, penulis memilih Laboratorium Teknologi Biokimia Teknik Kimia untuk pengerjaan Tugas Akhir studinya. Penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir Pra-Desain Pabrik berjudul “Sodium Lignosulfonat (Na-LS) dari *Black Liquor*” dan Tugas Akhir penelitian yang berjudul “Studi Kinetika Reaksi Penyerapan Gas CO<sub>2</sub> dalam Biogas Menggunakan MDEA Berpromotor Campuran Asam Amino” di bawah bimbingan Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M.Eng. Penulis terbuka terhadap kritik dan saran yang membangun mengenai penelitian ini dan pembaca dapat menghubungi penulis melalui informasi di bawah ini.

### Data Penulis

Nama	: Audria Aliza Setio Utari
Alamat	: Komplek Sekneg Lama No. 53, Jl. Cidodol, Kebayoran Lama, Jakarta Selatan.
Email	: audriaaliza@hotmail.com